



30007 31. 24  
**UNIVERSIDAD LA SALLE**

**ESCUELA DE INGENIERIA  
INCORPORADA A LA U.N.A.M.**

**FABRICACION EN MEXICO DE ALABES  
PARA TURBINAS DE GAS  
- CONVENIENCIA Y FACTIBILIDAD -**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A  
MARIA DEL CARMEN ORTIZ DELGADO**

**MEXICO, D. F.**

**1 9 8 6**



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Fabricación en México de álabes para turbinas de gas

- Conveniencia y Factibilidad -

1. Conclusiones y Recomendaciones	1
2. Introducción	4
3. Turbina de gas	30
3.1. Turbina, definición	
3.2. Turbina de gas, definición	
3.3. Turbina de gas, ciclo fundamental	
3.4. Turbina de gas, historia	
4. Energía	41
4.1. Concepto de energía	
4.2. Formas de energía	
4.3. Fuentes de energía	
4.4. Conversiones energéticas	
5. Termodinámica aplicada a la turbomaquinaria térmica	52
5.1. Conceptos básicos	
5.2. Ciclo de Carnot	
5.3. Ciclo de Brayton	
5.3.1. Ciclo abierto	
5.3.2. Ciclo cerrado	
5.3.3. Ciclo semi-cerrado	
5.3.4. Modificaciones al ciclo básico	
6. Combustión	97
6.1. El proceso de combustión	
6.2. Combustibles	

7.	Mecánica de fluidos aplicada a la turbomaquinaria térmica	111
7.1.	Conceptos básicos	
7.1.1.	Ecuación de continuidad para un volumen de control	
7.1.2.	Ecuación de la energía para un volumen de control	
7.1.3.	Ecuación de la cantidad de movimiento para un volumen de control	
7.2.	Turbomaquinaria	
7.2.1.	Flujo a través de los pasajes de los álabes de una turbina	
7.2.2.	Tipos de turbinas térmicas	
7.2.2.1.	Maquinaria de flujo axial	
7.2.2.2.	Maquinaria de flujo radial	
8.	Componentes de una turbina de gas	166
8.1.	Compresores	
8.2.	Cámaras de combustión	
8.3.	Turbinas	
8.4.	Características estructurales	
8.4.1.	Compresor	
8.4.2.	Cámara de combustión	
8.4.3.	Turbina	
8.4.4.	Enfriamiento	
8.5.	Disposiciones de las turbinas de gas	
8.6.	Condiciones de diseño	
9.	Combustibles empleados en las turbinas de gas	199
10.	Características de una turbina de gas	203
11.	Utilización	209
11.1.	Aeronaves	
11.2.	Generación eléctrica	

11.3.	Industria	
11.4.	Locomoción	
11.5.	Marina	
11.6.	Automotriz	
12.	Mantenimiento y reparación general	218
12.1.	Generalidades sobre mantenimiento	
12.2.	Mantenimiento de una turbina de gas	
13.	Alabes	234
13.1.	Descripción	
13.2.	Diseño y construcción de los álabes	
13.3.	Defectos	
13.4.	Materiales	
13.4.1.	Aleaciones para elevadas temperaturas	
13.4.2.	Comportamiento de los materiales a elevadas temperaturas	
13.4.3.	Aleaciones resistentes al calor y sus propiedades	
13.4.4.	Factores que deben considerarse en la elección de materiales	
13.4.5.	Elección del material para los álabes de una turbina de gas	
14.	Elección de un proceso de manufactura de álabes	334
14.1.	Etapas básicas en la manufactura de un producto	
14.2.	Microfundición	
14.2.1.	Método básico	
14.2.2.	Ventajas	
14.2.3.	Particularidades constructivas	
14.2.4.	Costos	
14.2.5.	Propiedades de los fundidos	
14.2.6.	Materiales	

15. Equipo necesario en una planta productora de álabes para turbinas de gas que observe el proceso de microfundición	366
15.1. Equipo para la producción de modelos	
15.2. Equipo para la producción de moldes	
15.3. Equipo para la fusión y colada del metal	
15.4. Equipo para la limpieza y acabado de las piezas(1)	
15.5. Equipo para tratamiento térmico	
15.6. Equipo para la limpieza y acabado de las piezas(2)	
15.7. Equipo para medición y control	
16. Estimación del costo de fabricación de un álabe	396
17. Requisitos de instalación	414
18. Estudio de mercado	425
Bibliografía	443

## 1. Conclusiones y Recomendaciones

Históricamente, los países en vías de desarrollo han tenido una posición de dependencia completa a nivel tecnológico en cuanto a su producción industrial, recibiendo de los países adelantados, siempre o casi siempre, tecnologías obsoletas o parciales; hecho que los mantiene como ensambladores de productos ideados y diseñados en países y por los países desarrollados.

Las naciones en vías de industrialización se encuentran, la mayoría de las veces, en la necesidad de tener que adquirir tecnología, ingeniería y diseños para satisfacer sus necesidades industriales y aumentar así su grado de industrialización y desarrollo; sin embargo, esta adquisición se ha limitado a ingeniería de producción y no a la de proceso, reduciendo en mucho la posibilidad de modificar los diseños en relación a las particulares necesidades de cada país.

Los intentos de transferencia de tecnología a veces tienen poco éxito porque la eficacia de la transferencia es tanto mayor cuanto menor es la diferencia en el grado de industrialización del país emisor y el del país receptor.

Este hecho implica no sólo un fomento a la industrialización como tal, sino un desarrollo profundo de escuelas, universidades,

laboratorios de investigación, centros de estudios y, no último, creación de infraestructuras industriales y sociales, tales como carreteras, ferrocarriles, empresas de ingeniería y amplios mercados.

Este trabajo está relacionado a la idea de una industrialización desarrollada a pequeñas etapas, más específicamente, en la adquisición de capacidad de reparación de maquinaria antes de su posible fabricación en el país.

Claro está que la maquinaria escogida tiene que ser una de las más avanzadas a nivel de ingeniería y tecnología, pero al mismo tiempo que sea básica para el desarrollo económico, industrial y social de un país.

Se escogió, por lo tanto, la turbomaquinaria térmica en su parte más avanzada, la turbina de gas, y aún más específicamente uno de los componentes más críticos que es el álabe, que lleva consigo toda la problemática de materiales, ingeniería, diseño y cálculo matemático entre las más sofisticadas de la actualidad.

La idea básica para el desarrollo de este trabajo es la instalación en México de una fundición, con proceso de microfundición, para la fabricación de los álabes de turbinas de gas necesarios para la reparación, por medio de la sustitución de piezas dañadas,

de estas turbinas que para las condiciones particulares de trabajo necesitan de un continuo y frecuente mantenimiento con cambio del 30% de los álabes cada ciclo de mantenimiento.

Los materiales utilizados son de tipo especial, pasando de los aceros inoxidable, hasta las aleaciones a base de titanio.

Las condiciones tecnológicas y de mercado por este particular tipo de proyecto investigados a fondo, permiten afirmar la posibilidad de éxito de un proyecto de esta envergadura, aunado a la enorme potencialidad en la tecnología que se puede adquirir relacionada no sólo al campo de la turbomaquinaria térmica, sino a muchos otros campos industriales.

El análisis de tipo económico efectuado, muestra la conveniencia de una planta de este tipo, sea en cuanto a segmento de mercado cubierto, como en cuanto a costo de cada álabe que se fija en 6, 7 veces menor que el costo en el mercado internacional.

## 2. Introducción

El equilibrado desarrollo económico, industrial y social de los llamados países en vías de desarrollo, requiere, entre otros factores, del logro de un cierto grado de autodeterminación científica y tecnológica, entendiendo con este término la capacidad de solucionar problemática industrial, desarrollando y resolviendo cada etapa de la elaboración de un producto. En otras palabras, frente a una necesidad de tipo técnico, tener la capacidad de diseñar, en relación a las condiciones infraestructurales y nacionales, los productos aptos a satisfacer esta necesidad.

El alcance de dicha autodeterminación implica el establecimiento de una política de fomento a la tecnología, ingeniería y fabricación nacionales generalmente riesgosa, costosa / siempre de largo plazo.

Históricamente, los países en vías de desarrollo han tenido una posición de dependencia completa a nivel tecnológico en cuanto a su producción industrial, recibiendo de los países adelantados, siempre o casi siempre, tecnologías obsoletas o parciales; hecho que los mantiene como ensambladores de productos ideados y diseñados en países y por los países desarrollados.

Cuando se ha asistido a una transferencia de tecnología,

ésta se ha limitado a las más obsoletas y, por tanto, las más costosas; cuando se ha observado una transferencia de ingeniería, ésta se ha limitado a una ingeniería de producción y no a la de proceso, reduciendo en mucho la posibilidad de modificar los diseños en relación a las particulares necesidades de cada país.

Las naciones en vías de industrialización, se encuentran, la mayoría de las veces, en la necesidad de tener que adquirir tecnología, ingeniería y diseños para satisfacer sus necesidades industriales y aumentar así su grado de industrialización y desarrollo con la limitante de tener que comprar tecnologías desarrolladas para una problemática similar pero no igual a la del propio país; pensada y desenvuelta dentro de una infraestructura industrial, social y de conocimientos básicos diferente a la que se encuentra en el país comprador.

Casi todos los intentos de transferencia de tecnología para aumentar el grado de industrialización de un país hasta ahora realizados, han tenido poco éxito porque la eficacia de la transferencia es tanto mayor cuanto menor es la diferencia en el grado de industrialización del país emisor y el del país receptor. Este punto, a veces olvidado, o bien conocido pero poco tomado en cuenta de manera apropiada, es la causa principal del fracaso de numerosos proyectos industriales en los países latinoamericanos. Lo anterior implica no sólo un fomento a la industrialización como tal, sino

un desarrollo profundo de escuelas, universidades, laboratorios de investigación, centros de estudios y, no último, la creación de infraestructuras industriales y sociales tales como carreteras, ferrocarriles, empresas de ingeniería y amplios mercados.

No forma parte de este trabajo analizar a fondo los problemas del desarrollo industrial de una nación; sin embargo, no parece inútil subrayar la necesidad de asimilar tecnología por etapas, avanzando de una etapa a otra subsecuente en relación al nivel de madurez (capacidad para resolver la problemática particular) que se alcance en la etapa precedente.

El argumento de este trabajo está muy relacionado con esta idea de una industrialización en pequeños pasos, relativa a tecnologías más avanzadas, al entrar en el análisis de la posibilidad de realizar la reparación de una maquinaria antes de pensar en su fabricación. Claro está que la maquinaria escogida debe, para el efecto, ser una de las más avanzadas a nivel de ingeniería y tecnología, y que sea, al mismo tiempo, básica para el desarrollo económico, industrial y social de un país.

Así, se escogió turbomaquinaria térmica en su parte más avanzada de turbina de gas y aún más específicamente la de los componentes más críticos, que llevan consigo una problemática de materiales, ingeniería, diseño y cálculo matemático entre las más sofis-

ticadas de la actualidad.

Se denomina turbomaquinaria, bien a las máquinas que producen energía mecánica (trabajo) en forma rotatoria a partir de la energía existente en una corriente de fluido, bien a aquéllas que desarrollan trabajo sobre un fluido para incrementar la energía contenida en este último. Dentro del primer grupo se pueden mencionar las turbinas hidráulicas, las de vapor y las de gas (clasificación que obedece al fluido utilizado por la máquina para la transmisión de la energía: agua, vapor, gases de combustión o aire, respectivamente). Al segundo grupo pertenecen las turbobombas, los ventiladores y los turbocompresores.

Las turbomáquinas desarrollan trabajo sobre el fluido o extraen trabajo de él de manera continua al permitir que el fluido escurra a través de una serie de álabes móviles y fijos. (La teoría que explica este funcionamiento se incluye en el apartado correspondiente : la mecánica de fluidos).

Dentro de la turbomaquinaria destaca, por su importancia a nivel económico e industrial, la denominada térmica que se refiere exclusivamente a las turbinas de vapor y a las de gas. La energía mecánica obtenida de estas máquinas es empleada, entre otras utilizaciones, para la generación de energía eléctrica, en aplicaciones motrices y de transporte, para el accionamiento mecánico

de diversos dispositivos y para la realización de numerosas tareas en el campo industrial.

Desde su desarrollo práctico a fines del siglo pasado y comienzos del presente, la turbomaquinaria térmica, en especial la de vapor, permitió avances significativos en el campo energético y cambios profundos para la industria mecánica y metalúrgica.

La turbomaquinaria constituye la máquina motriz básica de la industria moderna; representa la supremacía tecnológica de máquinas motrices por sus aplicaciones, eficiencias y flexibilidad de diseños; la industria productora de turbomaquinaria constituye un núcleo avanzado de las industrias mecánicas, en cuanto al progreso de su tecnología, incluyendo diseño, materiales y fabricación.

Lo anterior se hace evidente al revisar su desarrollo, que ha exigido a los investigadores y fabricantes el desarrollo de tecnologías novedosas y sofisticadas, capaces de proporcionar piezas y componentes adecuados, de la forma exacta, de materiales resistentes a elevadas temperaturas y esfuerzos, etc.

Dentro de estas tecnologías se incluye la aceración de grandes lingotes necesarios para la forja abierta pesada y la fundición pesada; procesos a observar en la fabricación de turbomaquinaria, como se detalla más adelante. También cabe mencionar como ejemplo

los métodos de fabricación de aleaciones altamente resistentes al calor (que exigen tratamientos al vacío) y el empleo de tales materiales en la fabricación de partes observando técnicas especializadas.

En efecto, la turbomaquinaria ha impulsado todo este desenvolvimiento, y ha dependido de los logros alcanzados en los campos de ingeniería, metalurgia, manufactura, etc. para alcanzar los propios.

La turbomaquinaria también ha tenido la flexibilidad de adaptarse a los diversos cambios registrados como: saltos de escala gigantescos, energía nuclear, aplicaciones motrices y de transporte.

Además, es interesante comentar que todos los éxitos alcanzados, se extienden a otras muchas áreas industriales.

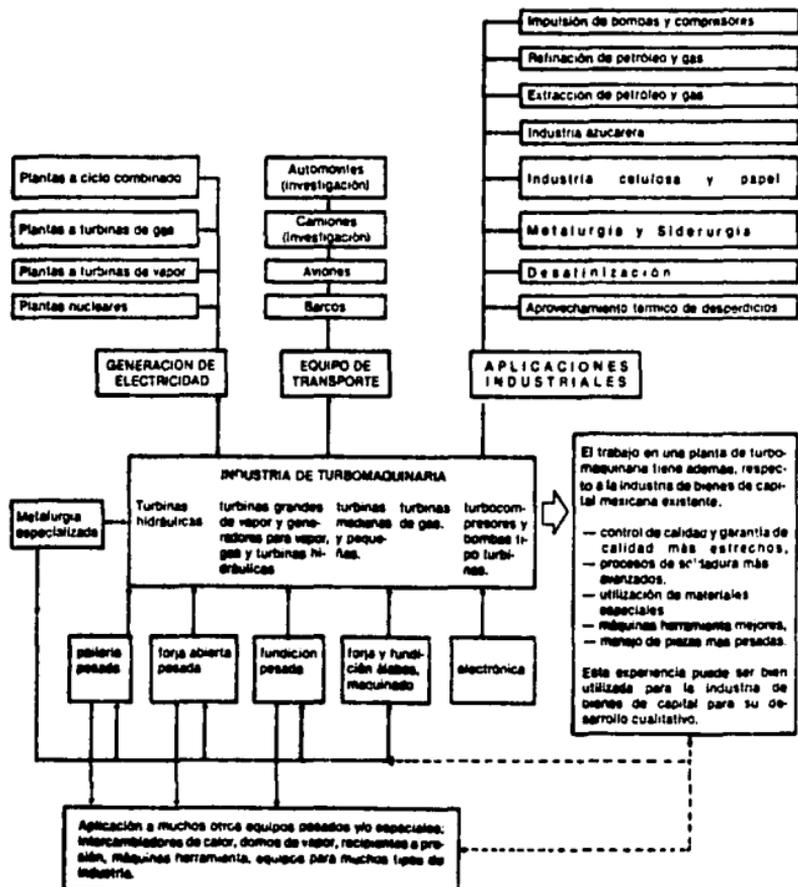
La importancia económica de la turbomaquinaria se extiende mucho más allá del ámbito de la producción de turbinas y turbogeneradores. Su papel como núcleo económico en la estructura de los bienes de capital<sup>1/</sup> se aprecia en el cuadro 2.1. Este cuadro ilustra esquemáticamente las relaciones de la turbomaquinaria, a través de sus componentes principales, con la industria existente y con la que se encuentra en desarrollo.

---

<sup>1/</sup> Se denomina de esta manera a aquellos bienes que sirven como vehículo o intermedio para producir otros bienes.

Cuadro 2.1

**ESQUEMA DEL PAPEL DE LA INDUSTRIA DE TURBOMAQUINARIA EN LA APLICACION Y MANUFACTURA DE BIENES DE CAPITAL.**



FUENTE: Elaborado de la Secretaría del Proyecto Conjunto de Bienes de Capital México-Canadá.

Se puede apreciar el extenso campo de aplicaciones: generación de electricidad (70 a 80% de la electricidad generada en el mundo), máquinas motrices de equipo de transporte, usos industriales diversos.

También se puede notar el hecho de que la industria básica que apoya a la industria de turbomaquinaria comprende a la paellería pesada, forja abierta, fundición pesada, tc.

Debido a que la industria de turbomaquinaria tiene un alto grado de tecnología, procesos, materiales y control de calidad, el desarrollo de las industrias de base debe estar acorde a estas necesidades. Una vez alcanzado este desarrollo, la industria de base estará en posibilidad de mejorar la producción de otros equipos pesados o especiales, tales como intercambiadores, recipientes, domos, etc.

Así, el dinamismo de la industria de turbomaquinaria y sus exigencias tecnológicas (como ya se había comentado), sientan las pautas de calidad, dimensión y diseño en una serie de industrias, tanto usuarias como suministradoras.

El hecho de que no haya producción interna de turbomaquinaria en un país determinado que cubra, al menos en parte, la demanda interna, lleva a importaciones muy elevadas, a una reducción en las perspectivas de la industria de base y complementaria, y a un

serio retraso de dicho país en una de las ramas más importantes de la ingeniería y la tecnología modernas.

En México, la magnitud de la demanda de turbomaquinaria para atender las crecientes necesidades de energía de su población (la evolución del consumo de energía primaria se puede apreciar en la figura 2.1(a), lo mismo que las fuentes de dicha energía en la figura 2.1(b)), alcanza una significación internacional.

Los principales demandantes de turbinas en México son:

**Petróleos Mexicanos (PEMEX)**

Utiliza básicamente turbinas de gas (687 unidades<sup>1/</sup>) de mediana y baja potencia<sup>2/</sup> para accionamiento en sistemas de ductos, producción, petroquímica y refinerías. Cuenta también con un gran número de turbinas de vapor (1 517 unidades<sup>1/</sup>) en rangos de baja y mediana potencia<sup>2/</sup>.

**Comisión Federal de Electricidad (CFE)**

Emplea principalmente turbinas de vapor (112 unidades<sup>1/</sup>)

---

1/ Parque de turbomaquinaria. México, 1985.

2/ Definiendo los rangos de potencia:

Turbinas de gran potencia: de 47 001 a 469 000 hp  
(35 049 a 350 000 kW)

Turbinas de mediana potencia: de 5 001 a 47 000 hp  
(3 729 a 35 048 kW)

Turbinas de baja potencia: hasta 5 000 hp  
(3 738 kW)

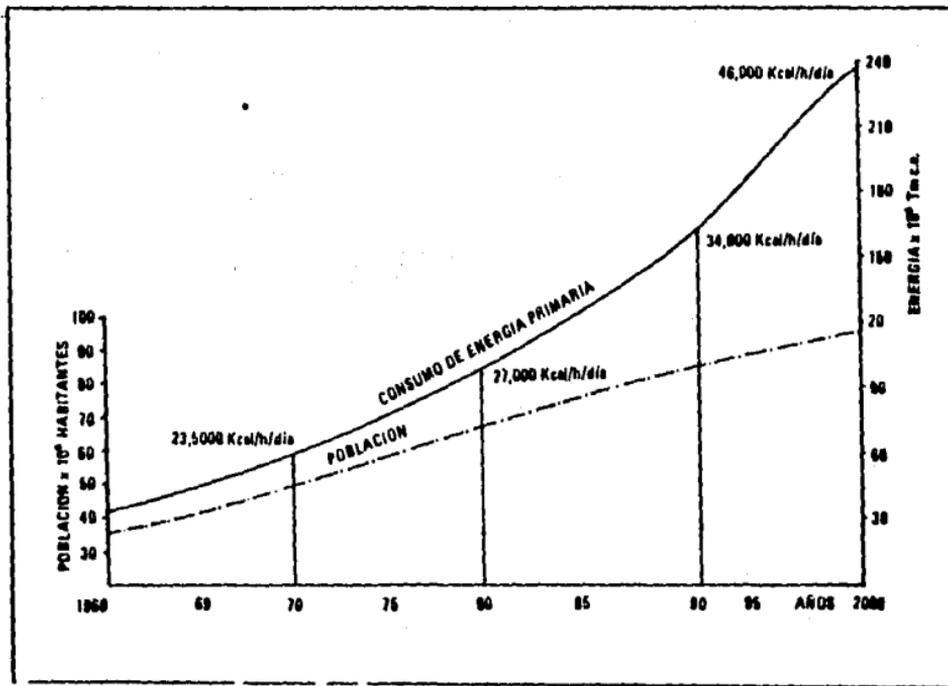


Figura 2.1 (a) Población y consumo de energía primaria en México. Fuente, PEMEX, CFE, SIC hasta 1985, subjetivos de 1986 a 2000, siguiendo criterios y ritmos de desarrollo (Gráfica presentada por Manuel Polo Encinas en su obra "Energéticos y Desarrollo Tecnológico")

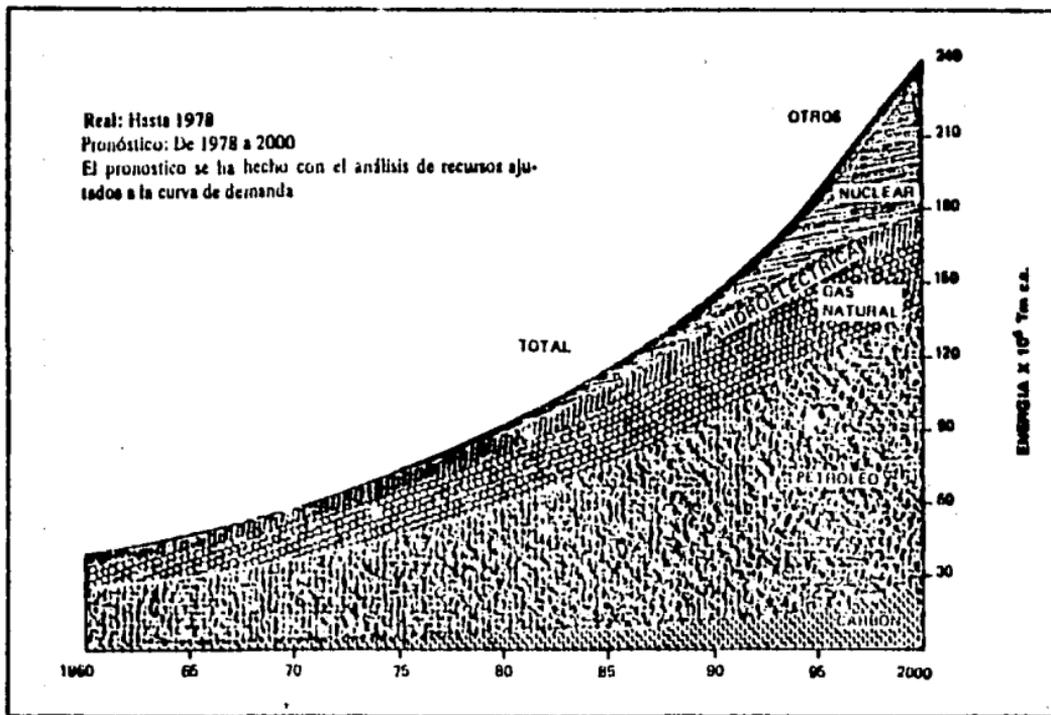


Figura 2.1 (b) Fuentes de la energía primaria en México (Gráfica presentada por Manuel Polo Encinas en su obra "Energéticos y Desarrollo Tecnológico")

de gran y mediana potencia<sup>2/</sup> para la generación de electricidad; en un número más reducido (84 unidades<sup>1/</sup>), utiliza turbinas de gas de mediana y gran potencia<sup>2/</sup>, como equipos auxiliares en la generación de energía eléctrica en los momentos de mayor demanda. Estas máquinas están acopladas a generadores de energía eléctrica y en algunos casos aprovechan el escape de los gases de las turbinas de vapor.

#### **Azúcar, S.A.**

Esta empresa utiliza exclusivamente turbinas de vapor (567 unidades<sup>1/</sup>) en bajo rango de potencias para el accionamiento de equipos en la producción de azúcar y para la generación de electricidad.

La generación de energía eléctrica en México, cuya evolución se muestra en la figura 2.2, es, en conclusión, el sector industrial que demanda una mayor cantidad de turbomaquinaria térmica, especialmente la de vapor, campo en el que este tipo de motor ocupa el primer lugar de manera indiscutible.

---

1/ Parque de turbomaquinaria. México, 1985.

2/ Definiendo los rangos de potencia:

Turbinas de gran potencia: de 47 001 a 469 000 hp  
(35 049 a 350 000 kW)

Turbinas de mediana potencia: de 5 001 a 47 000 hp  
(3 729 a 35 048 kW)

Turbinas de baja potencia: hasta 5 000 hp  
(3 738 kW)

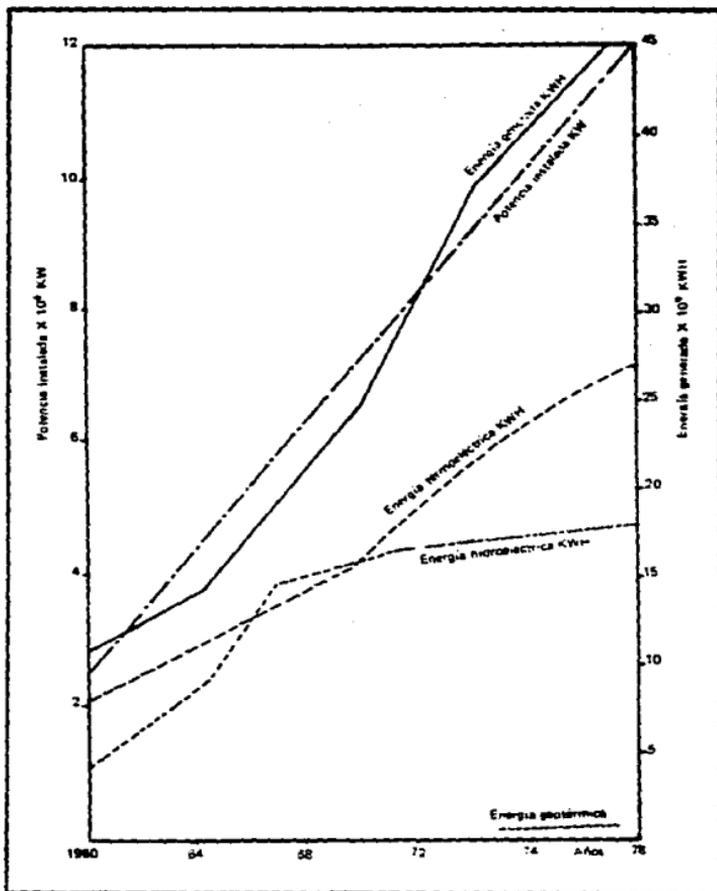


Figura 2.2. Potencia instalada y energía eléctrica generada en México. Fuente: Gráfica elaborada por Manuel Polo Encinas con datos de CFE, SC, DGE.

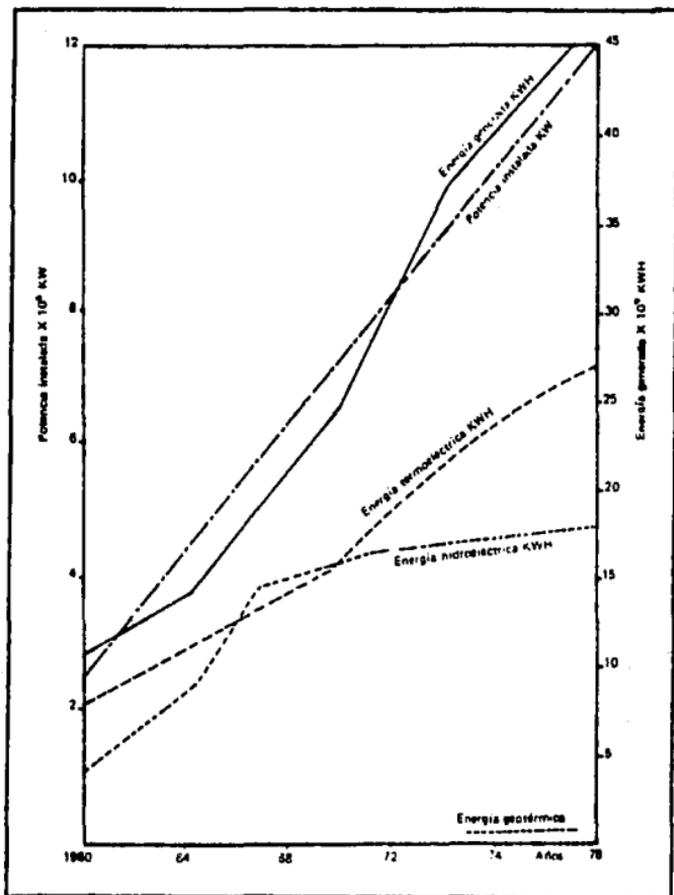


Figura 2.2. Potencia instalada y energía eléctrica generada en México. Fuente: Gráfica elaborada por Manuel Polo Encinas con datos de CFE, SC, DGE

El crecimiento de la capacidad de generación eléctrica instalada de 1976 a 1980, se calcula en 6.3% anual. Sin embargo, resultó insuficiente frente al crecimiento de la demanda en dicho periodo que fue del orden del 9% anual.

El mercado de turbomaquinaria térmica (principalmente la de vapor) en México, durante 1983, se estima alcanzó los 1 000 MW por año. Los planes recientes de CFE, previos a la recesión económica, preveían una demanda aproximada de 1 800 MW por año durante el periodo 1985, 1988.

La significación internacional de tal demanda se aprecia al compararla con la capacidad de producción aproximada de algunos de los fabricantes más importantes:

General Electric (USA)	:	8 000 MW/año
Westinghouse (USA)	:	6 000 MW/año
GEC (Inglaterra)	:	3 000, 4 000 MW/año

Al no haber producción interna de este tipo de equipo, el mercado mexicano se sitúa como una plaza muy atractiva para la exportación internacional, sobre todo en un momento de recesión en que el interés de los fabricantes en mantener su participación directa o indirecta en un mercado como éste se acentúa. En las figuras 2.3 (a) y (b), se ilustran las importaciones mexicanas de turbinas

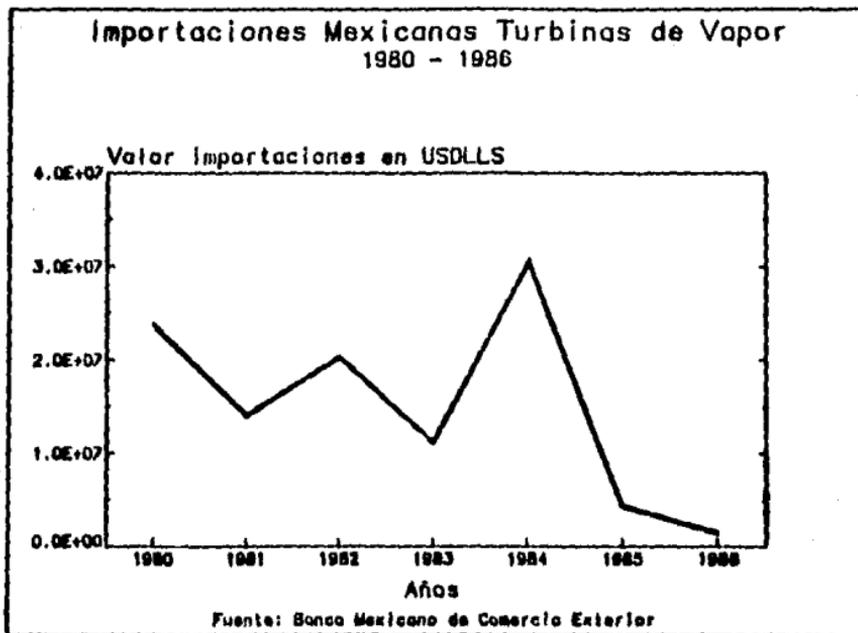


Figura 2.3 (a) Importaciones Mexicanas Turbinas de vapor  
1980 a 1986

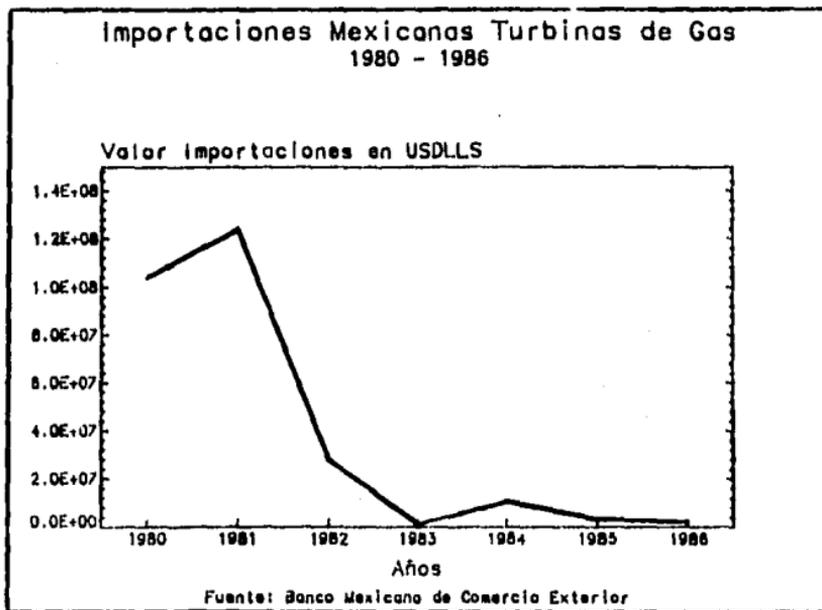


Figura 2.3 (b) Importaciones Mexicanas Turbinas de Gas  
1980 a 1986

de vapor y de gas respectivamente, durante los últimos años.

Al hacer referencia, complementando la información anterior, al caso de las turbinas de gas de tipo industrial (esto es, haciendo a un lado las unidades empleadas en la aviación), resulta interesante saber que México fue el primer comprador mundial durante seis meses de 1980, con un 30% de la demanda mundial por este tipo de turbinas; y que para 1985, su mercado constituyó un 10% del mundial. Otros demandantes importantes de tales motores, añadiéndolos a los ya mencionados son: la industria siderúrgica, la minera y la minerometalúrgica. En relación al campo energético, el empleo de turbinas de gas en plantas con ciclo combinado gas\_vapor y la posibilidad de combinar generación de energía con desalinización, se constituyen en elementos que agregan un mayor interés a estos motores para México.

Por todas estas razones, resulta transparente la importancia económica y tecnológica que tendría la fabricación de turbomaquinaria térmica en México. Sin embargo, es necesaria la realización de una breve consideración sobre las exigencias que tal fabricación implicaría. Esta consideración se muestra en los cuadros siguientes

De esta manera, a través de los componentes principales de las turbinas de vapor y de gas, es posible relacionar la industria de la turbomaquinaria con la de base existente o necesaria a desarrollar.

Cuadro 2.2: Comparación de las características principales de las turbinas de vapor y las turbinas de gas

	Turbinas de vapor	Turbinas de gas
Potencia unit. (máx.)	1 300 MW	150 MW
Temperatura del fluido a su entrada en la turbina (máx.)	540 °C	1 300 °C
Velocidad de rotación del rotor en rpm (máx.)	1 500/3 000; 1 800/3 600	hasta 35 000
Longitud total (máx.)	70 m	20 m
Peso total (máx.)	2 500 t	300 t
Peso del rotor (máx.)	hasta 500 t <sup>1/</sup>	Generalmente, el rotor se forma por la unión de discos forjados
Longitud del álabe más largo (máx.)	1 450 mm	200 mm
Tiempo de arranque	8 a 13 hr	8 a 25 minutos
Eficiencia termodinámica (máx.)	40 %	30 %
Relación potencia a peso	de 0.09 a 0.18 MW/t	de 0.36 a 0.9. MW/t
Comentarios	Necesita agua en grandes cantidades para enfriamiento.  Necesita mucho equipo auxiliar (generador de vapor, sistema de enfriamiento, etc.)	No requiere agua para el enfriamiento, empleando el aire proveniente del compresor.

<sup>1/</sup> Este peso corresponde al rotor terminado; se trata generalmente de un rotor forjado y maquinado a partir de un lingote de peso hasta tres veces superior a la pieza terminada.

Cuadro 2.3: Requerimientos de fabricación de una turbina de vapor

Componente	Proceso de manu_ factura	Materiales
Carcasa baja presión	Fundición pesada ó pailería pesada Maquinado de desbaste Tratamiento térmico	Hierro ó placa de acero
Carcasa alta presión	Fundición pesada, alta calidad Maquinado de desbaste Tratamiento térmico	Aleaciones de ace_ ro al C, C_Mo, Cr_ C_Mo ó acero inox. 15_8
Ejes	Forja abierta pesada Maquinado en máq, he_ rramienta de gran ta_ maño y potencia Tratamiento térmico	Lingotes de acero desgasificado de baja aleación
Alabes	Fundición liviana ó forja liviana ó rolado a partir de placa ó maquinado a partir de barras Tratamiento térmico	Aleaciones de ace_ ro (baja aleación e inoxidable)

Cuadro 2.4: Requerimientos de fabricación de una turbina de gas

Componente	Proceso de manu_ factura	Materiales
Carcasa del compresor	Fundición pesada Maquinado Tratamiento térmico	Aleaciones de alu_ minio, acero al carbono
Carcasa de la turbina	Fundición pesada Maquinado Tratamiento térmico	Acero al carbono
Ejes	Forja de discos; co_ nectados por soldadu_ ra o pasadores Maquinado Tratamiento térmico	Aleaciones de ace_ ro ricas en níquel y cromo
Alates	Microfundición ó forja de precisión; embas de alta cali_ dad Tratamiento térmico	Aleaciones de ace_ ro con níquel y cobalto (de eleva_ do grado de pure_ za)

En México, en relación a la turbomaquinaria, de acuerdo a la información anterior, hay problemas de infraestructura muy evidentes, de los que se puede comentar:

#### **Materiales**

Los materiales necesarios para componentes de turbina de gas (especialmente para álabes) no se fabrican industrialmente en México. Los necesarios para los componentes de turbina de vapor se fabrican sólo de algunos tipos pero el aseguramiento de calidad que tales procesos exigen no ha sido asimilado del todo.

Dos empresas que tienen capacidad para la fabricación de aceros especiales, aunque sea en cantidades reducidas, son: el Instituto Mexicano de Investigaciones Siderúrgicas (IMIS) y Acero Solar, S.A.. En efecto, tienen capacidad para fabricar superaleaciones y aceros especiales en barras y piezas fundidas, que incluye aceros inoxidables, de extra bajo carbono, aceros refractarios, aceros nitrogenados, aceros herramienta, aceros de endurecimiento por precipitación, aceros de mediz y baja aleación; superaleaciones base níquel y base cobalto; así como aleaciones sofisticadas como 22Cr, 5Al, 0.04C

#### **Procesos**

En cuanto a la producción de piezas forjadas, fundidas y maquinadas, la frontera productiva es la fijada por la empresa NKS. Esta es la planta fabricante de partes para bienes de capital más

importante del país. Realiza coladas de acero de hasta 150 t; alcanza coladas al vacío de un máximo de 130 t; puede procesar lingotes de 130 t y está en posibilidad de maquinarse piezas de 120 t. Estos datos no corresponden a la capacidad alcanzada en piezas terminadas, sino a la pieza a partir de la cual se inicia el proceso de formado del producto final. La capacidad de fundición y forjado en pieza terminada es, aproximadamente, de 70 t para cada proceso.

Los procesos de manufactura con materiales resistentes a temperaturas elevadas (los necesarios para los álabes de turbinas de gas, principalmente) y de piezas de tonelaje superior a las 70 t, no se encuentran asimilados por la industria mexicana. Lo mismo puede comentarse de la filosofía del aseguramiento de calidad tan avanzada que estas actividades, especialmente las primeras, involucran.

La fabricación de turbinas de vapor representa, conforme lo anterior, mayores exigencias desde el punto de vista de peso y dimensiones, en comparación con la turbina de gas.

La fabricación de turbinas de gas, en cambio, involucra el dominio de tecnologías más avanzadas referidas al diseño, a la fabricación de materiales especiales, al procesamiento de estos últimos (especialmente en piezas pequeñas de forma compleja), al aseguramiento de calidad en todos los procesos mencionados, al empleo de servomecanismos, etc. La asimilación de todas estas tec-

nologías avanzadas repercute, indiscutiblemente, en el desarrollo y en el nivel alcanzado por toda la industria en general.

Conforme a lo anterior, la fabricación de turbinas de gas se considera una opción más interesante para México.

Sin embargo, es necesario, para que la transferencia de tal tecnología sea efectiva, como ya se ha destacado, que la asimilación de la misma se realice por etapas.

El componente más crítico de la turbina de gas es el álabe, pieza sometida a las más severas condiciones de esfuerzo y temperatura durante la operación del motor. Involucra la problemática de diseño, cálculo matemático, materiales, procesos de manufactura, aseguramiento de calidad, etc. más sofisticada. Por ello se sitúa como la parte idónea para iniciar el proceso de asimilación de una tecnología, adecuada a las posibilidades y necesidades mexicanas.

Por otra parte, el fabricar piezas que requieran reemplazo constante en las unidades en servicio (como es el caso de los álabes) representa, además, la posibilidad de atender en el corto plazo, las necesidades de mantenimiento del equipo, situación que lleva consigo importantes conveniencias económicas.

De acuerdo a todo lo anterior, en México sería conveniente la realización de un proyecto para la instalación de una unidad

productora de álabes para turbinas de gas que incluya: el diseño de las piezas, de un proceso de obtención de aceros especiales resistentes a altas temperaturas y de uno para la manufactura de álabes.

Ninguna instalación industrial proporciona beneficios económicos en el corto plazo, requiere experimentar un proceso de aprendizaje para alcanzar su operación "de diseño" (esto es, las condiciones para las que fue diseñada y que deben corresponder a su máximo rendimiento) y, ya después, reportar ganancias. En el caso de verificarse una eficaz transferencia de tecnología, este proceso es más lento, representando con ello un mayor riesgo económico. Sin embargo, el desarrollo más firme y autónomo de un país involucra el afrontar riesgos y superarlos, así como aprender que los beneficios se obtienen a mediano y largo plazo a través de trabajo tenaz y constante.

En conclusión, la proposición para desarrollar un proyecto orientado a la fabricación en México de álabes para turbinas de gas, obedece a diversos factores, entre los que destacan:

- a) la necesidad que existe de turbinas de gas para la generación de energía eléctrica y mecánica, por parte de todos los países en su desarrollo;

- b) la necesidad nacional de asimilar y dominar tecnologías básicas de la industria de bienes de capital (teniendo presente que sin asimilación de tecnología se pierden oportunidades de comercio, se restringen avances industriales que se manifiestan en obsolescencia y baja calidad, y su consiguiente costo) que posteriormente permitan avances en materia metalúrgica y mecánica, en búsqueda de una cada vez menor dependencia tecnológica de los países industrializados.
  
- c) la necesidad de hacer avanzar las fronteras productivas (entendiendo por tal la producción de nuevos tipos de equipos, o de equipos en rangos superiores a los existentes. En cada caso, el avance implica nuevas máquinas o su mejor utilización, nuevas dimensiones o capacidades, etc. También implica la posibilidad de realizar los cálculos básicos de la ingeniería básica del equipo y los diseños correspondientes, el avance en la sustitución de materiales y componentes, etc.), en este caso, en el corto plazo, de los álabes y, a largo plazo, de la turbina completa;
  
- d) la necesidad de dar mantenimiento adecuado al equipo ya instalado y que demanda álabes al menor costo posible;
  
- e) La necesidad nacional de sustituir importaciones, en este caso representadas por los álabes necesarios para el mantenimiento

y que hasta ahora son adquiridos en los mercados internacionales.

La conveniencia de la proposición queda implícita en cada uno de los puntos anteriores.

A continuación se presenta, en detalle, la descripción, la historia, la teoría, las implicaciones tecnológicas (de materiales y procesos de fabricación) y la amplia utilización de la turbina de gas.

Aunque el material incluido pudiera parecer excesivo, puesto que abarca temas de termodinámica, mecánica de fluidos, materiales, procesos de manufactura, etc.; su presentación se considera necesaria para destacar aún más la importancia de la turbomaquinaria térmica, especialmente la turbina de gas, y fundamentar así la propuesta en cuestión con mayor energía.

Asimismo, se mencionan y comentan brevemente los procesos de manufactura de los álabes de una turbina de gas, y se selecciona el que se considera más conveniente. En relación a este último proceso, se detalla, inclusive, aunque de manera más bien cualitativa, el equipo que exigiría para poder establecer una unidad productora, las demandas tecnológicas y económicas y una primera manera de afrontarlas, a fin de evaluar, en forma preliminar, la posibilidad real de la propuesta que ocupa al presente trabajo.

### 3. Turbina de gas

#### 3.1. Turbina, definición

Técnicamente, una turbina es una máquina que produce energía mecánica en forma rotatoria utilizando la energía existente en un fluido. La energía de éste, originalmente en forma potencial, sea gravitatoria o térmica, se convierte en energía cinética (de velocidad) al pasar por un sistema de paletas o álabes fijos y móviles en la turbina. Se provocan cambios en la magnitud y dirección de la velocidad del fluido para que se produzcan fuerzas tangenciales continuas sobre los álabes del rotor. Estas fuerzas hacen girar el eje, obteniéndose así energía mecánica que puede ser empleada por el hombre para un sinnúmero de fines.

Esta definición excluye, por tanto, a todas las turbomáquinas fabricadas según los mismos principios, pero que requiere energía mecánica para efectuar trabajo, por ejemplo, realizar la compresión de fluidos.

Los fluidos más corrientemente empleados son el vapor de agua, el aire caliente o los productos de la combustión y el agua. De acuerdo con ello, las turbinas se clasifican en:

- a) turbinas de vapor,
- b) turbinas de gas y

c) turbinas hidráulicas.

En turbinas especiales para plantas nucleares terrestres o espaciales, se utilizan como fluidos de trabajo vapores de mercurio o sodio.

En otra clasificación de las turbinas, atendiendo a la variación del volumen específico del fluido durante su paso a través de la turbina, éstas se pueden catalogar en hidráulicas y térmicas. En las primeras, la variación de peso específico, y por tanto de volumen específico, no es muy sensible; mientras que en las segundas sí lo es. A esta última clasificación corresponden las turbinas de gas y de vapor (por ello también son denominadas turbinas de fluido compresible).

Es importante comentar, y como se detallará más adelante, el fluido que pasa a través de una turbina describe un proceso a flujo estable, durante el cual la transferencia de tecnología tiene lugar.

### 3.2. Turbina de gas, definición

La turbina de gas se puede definir como un motor térmico que convierte la energía térmica almacenada en un gas (aire o productos de la combustión) en trabajo mecánico (rotación de un eje).

Es conveniente establecer, para evitar futuras confusiones,

que en la práctica, el término turbina de gas tiene dos aplicaciones. La primera de ellas se refiere a una unidad motriz, compuesta por varias partes, en cada una de las cuales el fluido gaseoso de trabajo sufre una transformación termodinámica; la serie de tales transformaciones permite que la energía almacenada en el fluido se convierta en potencia mecánica. La segunda de las aplicaciones referidas, por su parte, nombra a una de las partes componentes de dicha unidad, específicamente a aquella en la que se verifica realmente la conversión en energía mecánica, mediante la expansión del fluido.

### 3.3. Turbina de gas, ciclo fundamental

El ciclo normal; entendiéndolo como ciclo la secuencia de transformaciones termodinámicas que sufre el fluido de trabajo de un sistema para que pueda utilizarse su energía; de una turbina de gas consiste en:

- 1) una fase de compresión;
- 2) una fase de aporte de calor (verificada, en las unidades en ciclo abierto, que son las de uso más generalizado, en una cámara de combustión al quemarse combustible líquido o gaseoso);
- 3) una fase de expansión (usando una máquina rotatoria), que es en la que se obtiene la transformación de energía interna en energía mecánica; se realiza en la turbina propiamente dicha;

4) una última fase de enfriamiento de los gases.

Todos estos procesos ocurren en flujo estable ininterrumpido; cada uno de ellos se lleva a cabo en el motor por una parte especial del mismo (toda esta información se amplía en apartados subsecuentes).

El ciclo más "sencillo" de una turbina de gas, y el más empleado, prevé la descarga de los gases después de la expansión directamente en la atmósfera; se denomina ciclo abierto.

Una turbina de gas operando en este ciclo, consiste básicamente en un compresor (1), una cámara de combustión (2) y una turbina (3), dispuestos como se muestra en la figura 3.1 (los números que siguen el nombre de cada parte corresponden a los utilizados en la figura mencionada).

El compresor eleva la presión del aire atmosférico que toma de manera continua, y lo dirige hacia el interior de la cámara de combustión donde se le agrega calor mediante la combustión de un material combustible. Los gases calientes resultado de la combustión, se expanden a través de la turbina y escapan a la atmósfera. La potencia obtenida en el eje de la turbina se emplea para operar el compresor (generalmente éste se encuentra montado en el mismo eje de rotación de la turbina) y, la restante, para la realización de diversas tareas útiles. El campo de utilización de la turbina

de gas es muy amplio, incluyendo: generación de electricidad, transporte, usos industriales; como se toca en detalle en el apartado correspondiente.

Debido a la baja eficiencia térmica del ciclo básico descrito (la justificación de tal comportamiento se establece más adelante; por ahora cabe comentar que la eficiencia está en función directa de la temperatura de entrada de los gases a la turbina, la que se encuentra limitada por la resistencia de los materiales de los componentes del motor, sobre todo de aquéllos expuestos a las condiciones de temperatura y esfuerzos más elevados), la instalación de una turbina de gas puede ser "complicada" con la adición de intercambiadores de calor de diferentes diseños y utilizaciones que permitan mejorar el rendimiento, la potencia utilizable y las características de funcionamiento. La conveniencia de la utilización de dichos accesorios involucra una evaluación técnica y económica de acuerdo a las necesidades específicas de la instalación en cuestión.

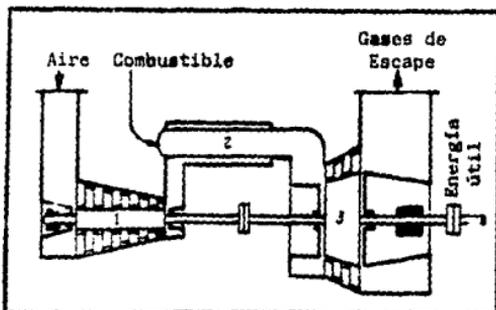


Figura.3.1. Ciclo Abierto Básico  
Turbina de gas

La teoría de una turbina de gas combina conocimientos relacionados con el movimiento de los fluidos, y los principios que lo gobiernan, y con la termodinámica y las leyes que la rigen.

La termodinámica plantea la serie de transformaciones a que debe ser sometido el gas empleado como fluido de trabajo para poder convertir, de la mejor manera posible, la energía térmica que contiene en trabajo útil.

La teoría de las turbomáquinas, establecida por la mecánica de fluidos a partir de su conocimiento de las leyes del comportamiento de los fluidos en movimiento, combinada con la termodinámica de los gases; plantea una manera "práctica" en que algunas de las transformaciones establecidas por el ciclo termodinámico de una turbina de gas pueden efectuarse (específicamente, la compresión y la expansión).

Aunque la aplicación técnica suele diferir considerablemente de las explicaciones teóricas (debido a que en estas últimas se realizan algunas suposiciones ideales y porque siempre intervienen una gran cantidad de variables: de índole mecánica, de materiales, etc.); la teoría es muy útil para comprender relaciones funcionales.

A pesar de que el presente trabajo no pretende ser un documento sobre termodinámica o sobre mecánica de fluidos compresibles,

se incluyen posteriormente capítulos que constituyen la base teórica de la turbina de gas. Ello para destacar la complejidad que, desde este punto de vista, tiene esta máquina. La complejidad tecnológica se establecerá a partir de las exigencias de su fabricación (materiales, procesos de manufactura, etc.)

#### 3.4. Turbina de gas, historia

Si bien el principio operativo de una turbina de gas era de tiempo atrás conocido, su realización práctica constituyó por mucho tiempo un serio problema, debido principalmente:

- 1) a la dificultad de obtener eficiencias adecuadas en el compresor;
- 2) a la carencia de materiales resistentes a altas temperaturas para la fabricación de las piezas componentes más importantes.

Hacia mediados del siglo XVII, el inglés John Wilkins describió un sencillo prototipo de turbinas de gas, ya anteriormente esquematizado por Leonardo da Vinci. El dispositivo consistía en una serie de paletas, similares a las del moderno molino de viento, unidas a una flecha vertical y colocadas en la chimenea de un horno; los gases calientes de escape que se elevaban, chocaban con las paletas y hacían posible que el aparato girara; por medio de un sistema de engranes muy simple se podía emplear el dispositivo para mover un esador o para realizar otras tareas sencillas.

La primera patente para una turbina de gas que opere en un ciclo, como lo hacen las unidades actuales, fue otorgada a John Barber en Inglaterra en 1791. Esta propuesta contiene muchos elementos esenciales en los que se basan las turbinas modernas.

En los años siguientes fueron propuestos algunos dispositivos novedosos, pero no fue sino hasta 1872 que se hizo algún avance significativo. Este vino con la concesión de una patente a F. Stolze, de Alemania, cuya turbina consistía de componentes separados: una cámara de combustión, un intercambiador de calor y un compresor de flujo axial y etapas múltiples directamente unido a una turbina de reacción y etapas múltiples. La máquina operaba de la siguiente manera: el aire comprimido era dirigido hacia el interior del intercambiador de calor donde era calentado mediante los gases de combustión procedentes de un horno independiente; el aire comprimido caliente pasaba por la turbina a través de la cual se expandía y regresaba a la atmósfera.

A pesar de que la turbina de gas de Stolze contenía casi todos los elementos de una moderna turbina de gas de ciclo abierto, ésta no tuvo éxito, en gran parte porque el compresor y la turbina no tenían la necesaria eficiencia para mantener la operación con la máxima temperatura de entrada permisible a los materiales de aquel periodo.

La primera turbina de gas exitosa fue construida en París

en 1903 y consistía de un compresor multietapas con tres cilindros seguidos de una cámara de combustión en la que el combustible líquido era quemado con aire suministrado por el compresor. Los gases calientes emitidos, después de ser enfriados por la inyección de agua, se expandían a través de una rueda de turbina de dos canales. La unidad era capaz de operar con una eficiencia de cerca del 3%. A pesar de ello, constituyó un logro significativo; fue la primera turbina de gas capaz de producir trabajo en una escala aceptable para propósitos comerciales.

En 1905, Hans Holzwarth de Alemania desarrolló la turbina del tipo explosión. Esta máquina consistía en una cámara de combustión de volumen constante dentro de la cual eran introducidos una carga de combustible y aire bajo presión. Siguiendo la ignición, la presión era incrementada a un valor aproximadamente 4.5 veces mayor que el original, causando que una válvula de resorte abriera, dejando pasar los gases hacia toberas que, a su vez, los direccionaban contra los álabes de la turbina. El mecanismo estaba arreglado de tal modo que la cámara de combustión era vaciada después de lo cual una nueva carga era introducida. Aunque actualmente la turbina Holzwarth no se emplea, representó una contribución única e importante.

En los años siguientes, los trabajos se dirigieron a buscar una mayor eficiencia de los compresores.

En 1924, el ingeniero francés M. Darrieus inició un estudio completo de compresores axiales logrando aumentar el rendimiento de estos mecanismos.

En 1939, Brown Boveri construyó la primera turbina de gas industrial de 400 kW, con un rendimiento térmico de 18% y adiabático en la turbina del 88%, con admisión de aire a 350°C.

En 1941, se construyó en Inglaterra el primer turborreactor para la Royal Air Force y desde entonces se inició el auge de estas máquinas en locomotoras, barcos.

En esta época, el destacado investigador inglés Sir Frank Whittle reconoció la aplicación de la turbina de gas para la propulsión a chorro de naves aéreas. Sus esfuerzos en este campo guiaron el desarrollo y el uso de naves aéreas militares en el Reino Unido y los Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial.

Desde entonces, la turbina de gas ha sido la máquina dominante en las aeronaves, ya sea como turbojet (que impulsa la aeronave por empuje del chorro), o como turbohélice (que usa un propulsor convencional = hélice, accionado por la turbina).

Después de la guerra, la turbina de gas adquirió un gran desarrollo, el diseño se volvió más técnico y menos empírico con lo que se pudieron mejorar las eficiencias de las turbinas.

Durante los años treinta y cuarentas, era común encontrar rendimientos del 60% en los compresores. Los rendimientos de las turbinas eran mayores, pero su combinación resultaba en que virtualmente todo el trabajo realizado por la turbina se empleaba para impulsar el compresor acoplado. Únicamente se pudieron lograr cambios de diseños convenientes mediante el análisis dinámico del fluido al pasar por los álabes del compresor y los álabes de la turbina, cambios que han dado por resultado eficiencias comprendidas entre el 75 y el 90% para los compresores y lograr eficiencias de la turbina en su complejo, comparables con los demás motores térmicos.

En Inglaterra, en 1950, se lograron aleaciones metálicas refractarias que permitieron elevar las temperaturas de admisión a la turbina a 700°C y de trabajo a 850°C, para funcionamiento normal hasta de 300 horas. Al mismo tiempo, se pudieron eliminar, en gran parte, las vibraciones mecánicas; reducir el volumen y peso conjuntos, aumentar a más del 20% el rendimiento térmico a plena carga.

La turbina de gas se viene desarrollando desde entonces, y todavía con mucha investigación por delante, en paralelo con el descubrimiento de materiales especiales para el trabajo a altas temperaturas, los logros en diseño de partes y componentes para condiciones supersónicas y al perfeccionamiento de técnicas sofisticadas de fabricación y garantía de calidad de componentes críticos

#### 4. Energía

El aumento constante en el mundo de la producción industrial, de la población y de su nivel de vida y de consumo, provoca y trae consigo un rápido crecimiento de las necesidades de energía. Ello ha originado, por parte de científicos y tecnólogos, la constante búsqueda de dispositivos y de disposiciones de los mismos que optimicen la obtención de energía utilizable. En este sentido, la turbomaquinaria térmica constituye uno de los logros más importantes.

Antes de entrar en detalle en la descripción de la turbina de gas, es interesante hablar un poco sobre las relaciones entre las varias formas de energía, las fuentes de energía y sus aprovechamientos y los puntos de la cadena energética donde la turbina desarrolla su importantísimo papel.

##### 4.1. Concepto de energía

El concepto de "energía", que tiene un significado matemático en relación a las descripciones teóricas de la realidad física, tiene en el sentido común una significación de algo indestructible, que puede presentarse bajo muchas formas (mecánica, electromagnética, nuclear, química, etc.) intrínseca de los cuerpos o de particulares campos, y que puede ser entre éstos transferible.

En otras palabras, si se considera un sistema cerrado (esto es, aislado de influencias externas), a éste se asocia una función matemática "energía" que es constante en el tiempo<sup>1/</sup>; sin embargo, desde un punto de vista más común se puede reformular esta definición en función del sistema; así se hablará de energía mecánica, de energía interna, de energía electromagnética, contenidas respectivamente en un cuerpo en movimiento (un flujo de agua), en un sistema termodinámico (el vapor), en un campo electromagnético (el creado por el movimiento de una corriente eléctrica) y todos estos tipos de sistemas resultan ser las "fuentes" de energía mencionadas.

Un término que se utilizará frecuentemente en este trabajo es el de "energía térmica" liberada o absorbida en un cierto proceso por un sistema termodinámico, por esto debe entenderse la energía intercambiada bajo forma de calor; por lo tanto, un sistema será considerado una fuente de energía térmica si por medio de particulares procesos puede ceder calor, modificando su propia energía interna.

#### 4.2. Formas de energía

La energía, siempre presente en todo sistema físico, se

---

<sup>1/</sup> Después de un ciclo de fenómenos siempre se encontrará la misma energía que había al principio, sólo se habrá transformado.

manifiesta bajo diferentes formas y características y, como se ha dicho, cualquier sistema capaz de transformar y permitir la disponibilidad de energía en cantidad y características utilizables representa una fuente.

#### 4.3. Fuentes de energía

Las fuentes están constituidas por "yacimientos" de sustancias que pueden liberar toda o parte de su energía contenida en forma potencial, o bien por fenómenos físicos que, por su mismo desarrollo permiten utilizar energía "instantánea". Se habla también de energía renovable, es decir, la que se reconstituye, a cargo de la energía solar<sup>1/</sup> y de energías "no renovables", que existen en cantidades finitas y si son utilizadas, jamás se podrán reestablecer.

La existencia de energía en un sistema físico, sin embargo, no es suficiente para convertir a éste en una fuente mientras no sea posible individuar un "proceso" de aprovechamiento relacionado a las características del mismo sistema, del estado de los conocimientos tecnológicos y científicos y, no último en importancia, de consideraciones puramente económicas. Un ejemplo de esto está constituido por el uranio y las sustancias fisiónables en general,

---

<sup>1/</sup> Como por ejemplo, la energía potencial de un lago ad alta cuota, una vez utilizada el agua para el movimiento de una turbina hidráulica situada a cuota más baja, el lago recupera su nivel a causa de las lluvias procedentes de nubes generadas de la condensación del agua que evapora de la superficie de la tierra a causa del calor del sol

que sólo desde hace pocos años y después de fundamentales descubrimientos científicos, se han podido aprovechar en su gran contenido energético.

Por contra, existen en la naturaleza yacimientos energéticos de notable potencialidad que no son aprovechados actualmente; probablemente se podrán encontrar, en pocos años, desarrollos tecnológicos capaces de permitir su utilización.

Las fuentes de energía pueden clasificarse bajo muchas características. En primer lugar se pueden subdividir en base a la forma energética potencial o instantánea directamente asociada a la fuente misma (gravimétrica, química, nuclear, electromagnética, cinética, etc.), que puede ser llamada forma primaria. Entre las fuentes potenciales, se tienen formas significativas tales como los bacinos hídricos, los combustibles, los materiales fisionables; mientras que entre las fuentes instantáneas se encuentran la radiación solar, el viento, las olas del mar, las mareas. A causa de su misma naturaleza, las fuentes de tipo potencial tienen la gran ventaja de permitir el almacenamiento y el transporte sin necesitar de transformación en otro tipo de energía, como se requiere para las energías de tipo instantáneo.

Desde otro punto de vista, y relacionando el fenómeno físico de donde se origina directamente la energía, se pueden individualizar fuentes relativas a:

- a) radiación solar;
- b) atracción gravitacional de cuerpos (mareas);
- c) fenómenos atmosféricos (energía hidráulica, vientos);
- d) depósitos geológicos (sólidos, líquidos, gases, tales como carbón, petróleo, gas natural);
- e) procesos vitales recientes (combustibles vegetales, como la leña; trabajo muscular);
- f) desechos energéticos de otros procesos (calor de desecho, calor de reacciones exotérmicas no utilizadas como fuentes de energía)
- g) fenómenos geotérmicos (vapor o agua caliente del subsuelo, rocas calientes);
- h) fenómenos relacionados a las propiedades estructurales de la materia: fisión y fusión nuclear (uranio, torio, deuterio, tritio);
- i) materiales sintéticos (combustibles sintéticos, explosivos, plutonio, hidrógeno) que pueden considerarse "secundarios", similarmente a la energía eléctrica, como se explica después.

Finalmente, al considerar la disponibilidad temporal de las fuentes, para su aprovechamiento económico, se puede distinguir entre:

- a) fuentes de disponibilidad continua (ríos, combustibles fósiles y nucleares);
- b) fuentes con acumulación periódica, anual o plurianual (bacinos montañoses, leña)

- c) fuentes a régimen irregular (vientos);
- d) fuentes a régimen periódico diario (radiación solar, mareas)

En la figura 4.1 se presentan, en forma esquemática, las fuentes de energía mayormente empleadas por el hombre en la satisfacción de sus necesidades, a través de 5 siglos, del XVIII al XXII inclusive; en parte confirmadas y en parte previsibles, de acuerdo con la orientación que viene teniendo la investigación y el desarrollo.

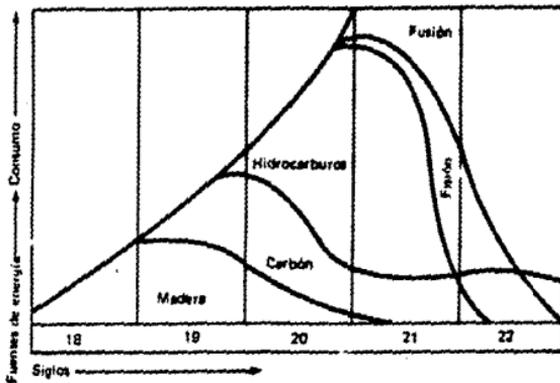


Figura 4.1. Fuentes de energía a través de los siglos

#### 4.4. Conversiones energéticas

Los procesos tecnológicos exigen energía para operar transformaciones en la materia. La energía, como ya se ha dicho, no se crea ni se destruye, sólo se transforma. Se aprovecha así la transformación o cambio que puede liberar energía convertible en trabajo.

Para llegar a las formas últimas de la energía que la hacen de fácil y eficaz aplicación, es preciso realizar conversiones. Estas conversiones, justificadas por una mejor calificación de la energía, determinan lógicamente un incremento en su uso, y por tanto, la exigencia de mayores cantidades de energía disponible.

De momento, y posiblemente por mucho tiempo, la forma eléctrica es la preferida, ya sea en las aplicaciones domésticas, comerciales o industriales.

Ahora bien, hoy en día la principal fuente de energía natural se halla en los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). Estos contribuyen, no sólo a la producción de energía eléctrica, sino también a satisfacer las necesidades del transporte y otras muchas en los campos industrial, comercial y doméstico. Sin embargo, el incremento en su consumo es causa de gran preocupación, no sólo porque se acelere su extinción por tratarse de recur-

son no renovables, sino también por los efectos contaminantes que originan los gases producto de su combustión. Esto ha obligado a la búsqueda de formas derivadas, unas veces como "combustibles sintéticos", otras con naturaleza diferente, como es la eléctrica, con las cuales se alivia o elimina la acción contaminante del ambiente.

Las conversiones a que se someten los energéticos naturales para encontrar formas de más fácil y conveniente aplicación reducen fuertemente la potencialidad de estos recursos. En la conversión de los combustibles fósiles en electricidad, por ejemplo, se pierde alrededor del 65% de su contenido energético que se disipa en calor en el ambiente. Esto, consecuentemente, reducirá inevitablemente la duración de los combustibles fósiles. Se espera que estos energéticos puedan soportar la fuerte demanda de energía mientras se generaliza el uso de la energía nuclear u otra fuente alternativa.

En la figura 4.2, se presenta un esquema de las principales conversiones energéticas que con base en las fuentes naturales conducen a la forma mecánico-eléctrica o a otras formas de aplicación directa.

Entre las fuentes naturales de energía no renovables se señalan los combustibles fósiles, carbón, petróleo y gas natural. Por simple combustión de éstos se obtiene calor que se transmite



a un fluido denominado "de trabajo" (agua o gas) para el transporte y uso en los procesos de calentamiento, o bien para que se desarrollen un ciclo termodinámico para la producción de trabajo mecánico y electricidad. En otros casos, los combustibles naturales se convierten en combustibles sintéticos derivados, de los que también se obtiene calor para las aplicaciones convenientes. Los combustibles sintéticos también se pueden obtener de la descomposición aeróbica y digestión anaeróbica de sustancias orgánicas. Con ciertos productos sintéticos se alimentan celdas de combustible. Otra fuente no renovable de energía es la nuclear, que depende de las disponibilidades uranio y torio, cuyos yacimientos no son inagotables. La energía nuclear puede tener origen en la fisión nuclear o en la fusión termonuclear. La primera se obtiene como resultado de la fisión del uranio 235 o del torio 232, elementos fácilmente fisionables con neutrones lentos. Tanto del proceso de fisión como del de fusión se aprovecha el calor de la reacción exotérmica nuclear, el cual se aplica a la producción de vapor como fluido de trabajo que mueve turbinas que accionan a generadores de electricidad.

Entre las fuentes de energía renovables, se citan los aprovechamientos hidráulicos, la geotérmica, la solar y la del viento. La energía hidráulica se convierte por sencillos procedimientos dinámicos en energía eléctrica. En la energía geotérmica se aprovecha directamente el calor o vapor para mover a grupos turbogenera-

dores de electricidad. De la energía solar se aprovecha por una parte el calor, que en general no sufre transformación y se usa directamente; se intenta la conversión del calor en la electricidad. También tiene aplicación la acción fotoquímica en las celdas fotovoltaicas en la generación de electricidad en escala muy reducida. La energía del viento, todavía poco aprovechada, se convierte por medios sencillos en energía mecánica eléctrica.

Como puede observarse, en casi todas las conversiones, es preciso pasar por la "trampa de calor", que obliga a procesos irreversibles. En efecto, la forma calórica no proporciona buenos rendimientos con los sistemas de conversión utilizados, ocasionando, además, contaminación ambiental. Esta afirmación se explicará en detalle en el apartado sobre termodinámica que se presenta a continuación.

## 5. Termodinámica

La termodinámica es el estudio que se refiere a la energía, los diversos conceptos y leyes que describen la conversión de una forma de energía en otra, y los diversos sistemas empleados para efectuar las conversiones.

Los motores que usan gases como "medio energético" funcionan según ciclos bien definidos (establecidos a partir de la experiencia y de diversos estudios). En ellos se suponen condiciones ideales y se establecen la serie de transformaciones que debe sufrir el gas a fin de poder aprovechar su energía.

A continuación, para comprender el funcionamiento de una turbina de gas, y para justificar la presencia y disposición de sus varias partes componentes, se resumen algunos aspectos básicos de la termodinámica.

### 5.1. Conceptos Básicos

Entendiendo por sistema una porción definida o limitada de materia o de espacio determinado y de magnitud fija, y por trabajo la acción de una fuerza ejercida en un desplazamiento en la dirección de dicha fuerza; se puede considerar que:

Un sistema tiene energía cuando es capaz de desarrollar cierto trabajo. Se valúa esta energía por la cantidad de trabajo que puede desarrollar.

Recordando los conceptos que sobre la energía se han expuesto con anterioridad, en el capítulo precedente, ésta puede existir en diferentes formas tales como:

- a) energía cinética o potencial del sistema<sup>1/</sup> considerado como un todo;
- b) energía asociada con el movimiento y posición de las moléculas;
- c) energía asociada con la estructura del átomo;
- d) energía química;
- e) energía eléctrica, etc.

La ley de la conservación de la energía, establece que ésta no puede ser creada ni anulada, sólo puede transformarse de una forma en otra.

La energía puede transmitirse de un sistema a otro mediante dos procesos:

- 1) realización de trabajo,
- 2) intercambio de calor.

---

<sup>1/</sup> La suma de la energía potencial (que depende de la configuración del sistema, de la disposición recíproca de las partículas del sistema y de su posición en el campo de fuerza externa) y de la energía cinética (medida del movimiento mecánico), se conoce como energía mecánica del sistema.

La transmisión de energía en forma de trabajo tiene lugar a través de la interacción de un sistema con otro u otros, o de un sistema con sus alrededores. Se presenta si la energía que cruza el límite del sistema es el resultado del movimiento de una fuerza.

La transmisión de energía por intercambio de calor, por su parte, está condicionada por la diferencia de temperatura entre dos sistemas (ocurre de un sistema que está a una temperatura, a otro a una temperatura más baja). Puede realizarse por contacto directo o por la emisión o absorción de radiación electromagnética. La energía recibida por un sistema en forma de calor produce aumento de la energía interna<sup>1/</sup> del mismo.

Sobre el calor y el trabajo; se puede comentar además, que:

- 1) Son fenómenos transitorios; los sistemas nunca tienen calor o trabajo, pero cualquiera o ambos, cruzan el límite del sistema cuando éste sufre un cambio de estado<sup>2/</sup>.
- 2) Son fenómenos de límite; ambos se observan solamente en los límites del sistema y ambos representan la energía que cruza el límite del sistema.

---

<sup>1/</sup> Esta energía se debe a la actividad molecular; depende de la presión, densidad y temperatura del sistema.

<sup>2/</sup> En ocasiones se suele hablar de "energía calórica" contenida en un cuerpo, o "calor" almacenado en un sistema. Esto es incorrecto. El término "energía térmica", como se aplicará en este trabajo ya se ha establecido.

## 5.2. Ciclo de Carnot

Si se define como máquina térmica un sistema que opera en un ciclo termodinámico<sup>1/</sup> y ejecuta una cierta cantidad de trabajo como resultado de la transmisión de calor de un cuerpo de temperatura alta a uno de temperatura baja; y como rendimiento térmico la relación entre la salida (trabajo) y la entrada (calor), se puede decir:

De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, que descansa en evidencias experimentales, en todas las transformaciones termodinámicas y en las máquinas térmicas es imposible transformar todo el calor (energía interna del fluido) en energía mecánica (trabajo). Parte de él tiene que ser cedido a temperaturas más bajas que las del aporte de calor.

Esto significa que es imposible construir una máquina térmica que tenga un rendimiento térmico del 100%. El máximo rendimiento que se puede obtener queda establecido por el del ciclo ideal,

---

<sup>1/</sup> Un sistema puede existir en varios estados.

El estado puede identificarse o describirse por ciertas propiedades macroscópicas observables (temperatura, presión, densidad, etc.)

Ocurre un cambio de estado cuando una o más de las propiedades de un sistema cambian.

Un proceso es la trayectoria de la sucesión de estados por los que pasa el sistema.

Cuando un sistema en un estado inicial dado, pasa por varios cambios o procesos y finalmente vuelve a su estado inicial, el sistema ha operado un ciclo. Si es la misma sustancia la que siempre recorre el ciclo, entonces éste se denomina cerrado.

denominado "de Carnot", y que no alcanza a superar, en la práctica, rendimientos del 50%.

El objetivo de que las máquinas térmicas aproximen su rendimiento al del Ciclo de Carnot siempre se persigue. Sin embargo, los logros son muy lentos, y el aumentar el rendimiento aunque sea muy levemente, representa generalmente costos demasiado altos. Además, el ganar pocos puntos en el rendimiento, significa entrar en diseño y materiales muy sofisticados, aptos a la presión y temperatura del trabajo. El rendimiento global de una turbina de gas, por ejemplo, depende del rendimiento de las partes que la componen, de las pérdidas de fluido y presión, de la relación de presiones y temperatura de entrada y salida de la turbina misma, del rendimiento de la combustión o del intercambio de calor, etc.

Para establecer el ya mencionado Ciclo de Carnot, es necesario fijar primero el concepto de proceso reversible.

Un proceso reversible para un sistema, se define como un proceso que una vez que se efectúa, puede invertirse sin hacer ningún cambio ni en el sistema ni en el medio circundante<sup>1/</sup>.

---

<sup>1/</sup> Es posible volver al sistema a su estado original, pero para ello se requiere adición de calor, o la verificación de algún trabajo, con lo que el medio circundante se altera.

Sin embargo, el proceso reversible es ideal, no se lleva a cabo<sup>1/</sup>. Hay muchos factores que hacen irreversible un proceso como son: fricción, expansión ilimitada, transmisión de calor a través de una diferencia finita de temperaturas<sup>2/</sup>, mezcla de dos sustancias diferentes, etc.

Si se analiza una máquina térmica que recibe calor de un depósito a temperatura alta y expide calor a otro depósito de temperatura baja y además, se supone que opera en un ciclo en el cual cada proceso es reversible, el ciclo completo también es reversible; si este ciclo se invierte, la máquina térmica se convierte en un refrigerador.

Este es el ciclo más eficiente que puede operar entre dos depósitos de temperatura constante y se denomina Ciclo de Carnot.

Este ciclo tiene siempre los mismos 4 procesos básicos:

---

1/ Todos los procesos son irreversibles en algún grado. En todos los procesos naturales parece existir una irreversibilidad, es decir, una tendencia universal a que la energía degenera en otras formas menos útiles; en otras palabras, a una degradación inevitable (concepto de entropía). Este hecho queda manifestado en la Segunda Ley de la Termodinámica.

2/ Un proceso de transmisión de calor es irreversible; se aproxima a un proceso reversible conforme el calor se transmite a través de una diferencia infinitesimal de temperatura.

Un suministro isotérmico<sup>1/</sup> reversible de calor

Un proceso adiabático<sup>2/</sup> reversible durante el cual el sistema realiza trabajo

Una cesión isotérmica<sup>1/</sup> reversible de calor

Un proceso adiabático<sup>2/</sup> reversible durante el cual se hace trabajo sobre el sistema.

El Ciclo de Carnot, esto es, la realización de los cuatro procesos básicos, puede ejecutarse de muy diversos modos: empleando sustancias diferentes, utilizando distintos equipos para la realización de los procesos, etc.

Los ciclos termodinámicos pueden representarse en diagramas en los que es posible apreciar el comportamiento de las variables que intervienen.

En la figura 5.1 se muestra el diagrama Presión-Volumen del Ciclo de Carnot. En éste, lo mismo que en el de la figura 5.2, el primer proceso del ciclo está representado por la línea 1-2; el segundo por la 2-3; el tercero por la 3-4 y el cuarto por la 4-1

---

1/ Proceso isotérmico es aquél en el que la temperatura del sistema permanece constante.

2/ Proceso adiabático es aquél en el que no hay aporte o extracción de calor al o del sistema

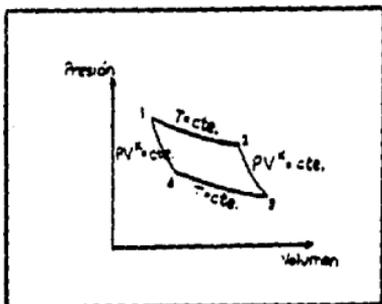


Figura 5.1. Ciclo de Carnot, diagrama P-V

La Segunda Ley de la Termodinámica, como ya se ha comentado, introduce el concepto de entropía. En palabras simples pudiera decirse que esta propiedad termodinámica (comúnmente representada por  $s$ ) nos indica la variación total de la cantidad de calor apta para transformarse en trabajo según la temperatura. Matemáticamente,

$$ds \equiv \left( \frac{dQ}{T} \right)_{\text{rev}} \quad , \quad \text{donde } Q = \text{calor}$$

Hay dos caminos por los que puede incrementarse la entropía de un sistema, principalmente por la transmisión de calor al sistema, y por estar sometido el sistema a un proceso irreversible; ya que el trabajo perdido no puede ser menor que cero, sólo hay un camino por el que la entropía de un sistema puede disminuir y es el de la transmisión de calor del sistema.

De acuerdo con esto, en los procesos adiabáticos reversibles, en los que no hay transmisión de calor, la entropía permanece constante; es por ello que reciben el nombre de isoentrópicos.

En los procesos isotérmicos, en los que la transmisión de calor es positiva<sup>1/</sup>, la entropía del sistema aumenta durante el proceso. Contrariamente, cuando en el proceso la transmisión de calor es negativa<sup>1/</sup>, la entropía del mismo decrece.

Conforme con lo anterior, es posible representar el Ciclo de Carnot en un diagrama Temperatura-Entropía (T-s), como se muestra en la figura 5.2.

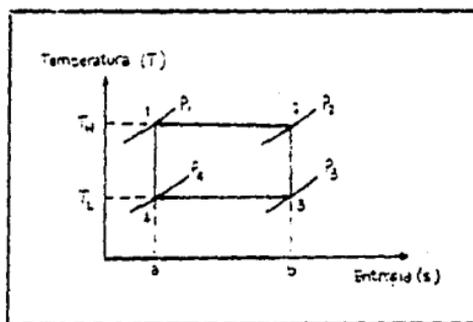


Figura 5.2. Ciclo de Carnot, diagrama T-s

En la figura anterior, y de acuerdo con la definición de

entropía,

el área 1-2-b-a-1 representa el calor transmitido al fluido de trabajo durante el proceso;

el área 3-4-a-b-3 representa el calor transmitido del fluido de trabajo a la fuente de temperatura baja.

El trabajo neto del ciclo es igual al calor neto transmitido y está representado por el área 1-2-3-4-1.

De acuerdo con esto, el rendimiento térmico del ciclo será:

$$\eta_{\text{tér.}} = \frac{W_{\text{net}}}{Q_H} = \frac{\text{área } 1-2-3-4-1}{\text{área } 1-1-b-a-1}$$

Este rendimiento depende sólo de las temperaturas a las cuales el calor es añadido y es cedido, y está dado por la relación,

$$\eta_{\text{tér.}} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{T_4}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_2}$$

Se puede observar que se aumenta el rendimiento:

aumentando  $T_H$  mientras  $T_L$  permanece constante o disminuyendo  $T_L$  mientras  $T_H$  permanece sin variación.

---

1/ Convencionalmente, en Termodinámica se considera que una transmisión de calor es positiva cuando se aporta energía térmica al sistema en cuestión; y que es negativa cuando se extrae energía térmica del mismo.

El Ciclo de Carnot que se plantea en teoría si el fluido de trabajo es aire, es el llamado "Ciclo de Carnot de aire normal" (entendiendo por aire normal, aire a 20°C y presión tenida a nivel del mar). Esquemáticamente, este ciclo se ilustra en la figura 5.3.

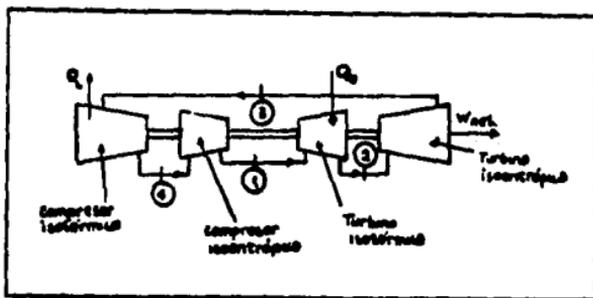


Figura 5.3. Ciclo de Carnot de aire normal

El rendimiento de este ciclo, además de poder expresarse por la relación de temperaturas como ya se ha hecho, también puede serlo por la relación de presión o de compresión durante el proceso isentrópico.

Debido a que este proceso es politrópico, esto es,  $PV^n = \text{constante}$ ; las relaciones entre  $P$ ,  $V$  y  $T$  se establecen como sigue:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^n ; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{(n-1)/n} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{(n-1)}$$

$$\text{Relación de presión isentrópica} = r_{ps} = \frac{P_1}{P_4} = \frac{P_2}{P_3} \quad \therefore \quad \frac{P_3}{P_2} = \frac{1}{r_{ps}}$$

$$\text{Relación de compresión isoentrópica} = r_{v2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_2}{V_3} \quad \therefore \frac{V_2}{V_3} = \frac{1}{r_{v2}}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_3}{T_2} \quad ; \quad \frac{T_3}{T_2} = \left( \frac{P_3}{P_2} \right)^{(k-1)/k} = \left( \frac{V_2}{V_3} \right)^{(k-1)}$$

$$\therefore \eta = 1 - \left( \frac{1}{r_{ps}} \right)^{(k-1)/k} = 1 - r_{ps}^{(1-k)/k}$$

$$\eta = 1 - \left( \frac{1}{r_{v2}} \right)^{(k-1)} = 1 - r_{v2}^{(1-k)}$$

donde  $k$  es la relación por cociente entre  $c_p$  y  $c_v$  que corresponden al calor específico<sup>1/</sup> a presión constante y a volumen constante respectivamente. En el caso de los gases perfectos o ideales (entre los que se considera el aire),  $k$  es una constante.

El Ciclo de Carnot de aire normal tiene algunas dificultades prácticas entre las que destaca la dificultad de transmitir el calor durante la expansión isotérmica y durante el proceso de compresión; es prácticamente imposible llegar a realizar esto en una máquina real que opera a una relación de velocidad razonable. Así, el ciclo no es práctico, pero constituye un parámetro de comparación para evaluar los rendimientos de otros ciclos. De hecho, siempre se busca alcanzar el rendimiento de aquél. Hay otros ciclos ideales de aire normal de aplicación más real, como el Otto, el Diesel, etc.

Los ciclos teóricos plantean la secuencia de los procesos

---

<sup>1/</sup> Considerando la unidad de masa de una sustancia, la cantidad de calor absorbido para conseguir un aumento de temperatura de un grado, se denomina calor específico de la sustancia.

termodinámicos a que debe ser sometido un fluido de trabajo para utilizar la energía almacenada en él en la producción de potencia mecánica. Para ello se asumen diversas idealizaciones.

Son importantes porque a partir de ellos se puede establecer en forma esquemática, la manera en que los dispositivos a emplear en las transformaciones deben disponerse para lograr el objetivo deseado.

Sin embargo, antes de que exista algún proceso importante en la resolución de problemas prácticos de ingeniería mecánica, se hace necesario considerar las leyes de la mecánica. En el caso de la turbina de gas, es requisito considerar los principios de la turbomaquinaria, entre otros factores.

### 5.3. Ciclo de Brayton

El ciclo ideal de una turbina de gas en su forma básica es el llamado Ciclo de Brayton, también denominado Ciclo de Joule.

El ciclo está formado por : (los números que siguen a cada proceso corresponden a los empleados en la figura 5.4)

1. compresión isoentrópica (1 a 2)
2. adición de energía a presión constante (2 a 3)
3. expansión isoentrópica (3 a 4)

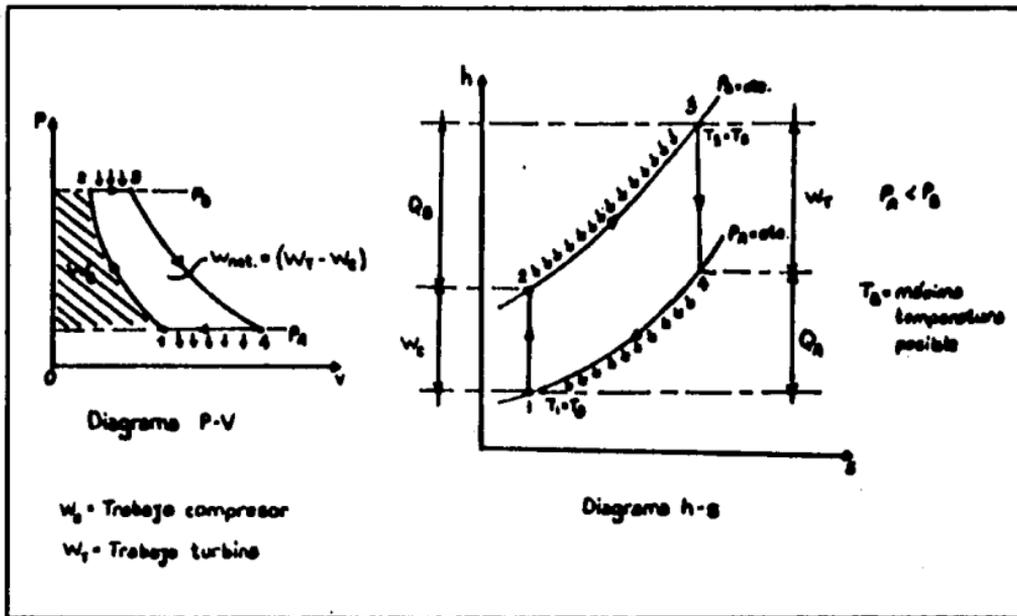


Figura 5.4. Ciclo de Brayton-Joule

#### 4. cesión de energía a presión constante (4 a 1)

Así definido, es un ciclo reversible porque se considera que todos los procesos son reversibles internamente.

En este ciclo se asume que el fluido de trabajo (aire) se comporta como un gas perfecto o ideal (y que su calor específico se mantiene constante).

Un gas ideal es un fluido en el cual no hay fuerza de interacción intermolecular. Este tipo de fluido obedece las leyes de Boyle, de Charles (o de Gay Lussac)

##### Ley de Boyle

A temperatura constante, el volumen de un determinado peso de un gas perfecto es inversamente proporcional a la presión absoluta, es decir, en tales circunstancias se verifica,

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = C$$

La curva que une los estados-punto que se hallan a la misma temperatura se denomina isoterma del gas y su forma es la de una hipérbola equilátera, como se muestra en la figura 5.5, sobre el plano P-V

Ley de Charles (6 de Gay Lussac)

Cuando un determinado peso de un gas perfecto recibe o cede energía mientras se mantiene a volumen constante, las presiones absolutas son directamente proporcionales a las temperaturas absolutas, esto es,  $P/T = C$

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

La curva que une los estados-punto que tienen el mismo volumen específico se denomina isócara. En un gas perfecto, las isócaras son líneas rectas verticales sobre el plano P-V (véase figura 5.5.)

Otra parte de la Ley de Charles dice que cuando un peso determinado de un gas perfecto absorbe o cede energía mientras se mantiene a presión constante, los volúmenes son directamente proporcionales a las temperaturas absolutas, es decir, que se verifica  $V/T = C$ , o sea,

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Las curvas que unen los estados-punto que tienen la misma presión se denominan isobaras. En un gas perfecto estas curvas

son líneas rectas horizontales situadas en el plano P-V (véase figura 5.5)

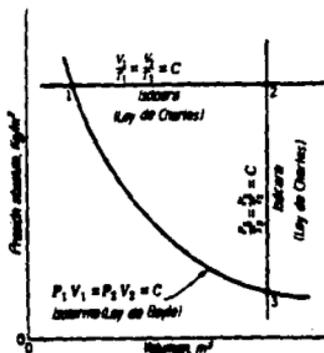


Figura 5.5. Relaciones correspondientes a un gas perfecto

En realidad no existe ningún gas perfecto; no obstante, el aire, oxígeno, nitrógeno, helio y otros varios gases se comportan con bastante aproximación como si fuesen gases perfectos, de tal suerte que pueden considerarse como tales. Todo gas se acerca a este estado ideal a medida que su temperatura crece y su presión disminuye, esto es, a medida que se recalienta o se aleja de aquel estado en el cual puede condensarse convirtiéndose en líquido.

A la temperatura ambiente el aire es un vapor altamente sobrecalentado, por lo que no hay mucho error al estimar que su calor específico no varía (dentro de un rango considerable), compor-

tándose como un gas ideal.

El estado del aire se determina especificando dos propiedades, mientras permanezca en forma gaseosa. En este caso, la relación entre presión, volumen específico y temperatura de la fase vapor puede expresarse por la ecuación que se llama "de estado".

$$P = f(v, T)$$

$$v = f(P, T)$$

Hay varias formas de ecuación de estado, siendo la más simple aquélla que se usa para un gas ideal

$$P\bar{v} = \bar{R}T, \quad \text{donde } \bar{R} \text{ es la constante universal de los gases}$$

Para un gas ideal, de acuerdo a las leyes ya mencionadas, los estados inicial y final están relacionados por la ecuación

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

La variación de entalpía (recordando que entalpía es la suma de la energía interna y el "flujo" de trabajo y que es una función de estado cuya variación da una medida de la cantidad de energía térmica suministrada o cedida por un sistema que evoluciona a presión constante) de un gas ideal o perfecto, es directamente

proporcional a su aumento o disminución de temperatura.

El rendimiento del Ciclo de Brayton-Joule se encuentra estableciendo las siguientes relaciones, haciendo referencia a los símbolos empleados en la figura 5.4.,

$$\eta_{\text{term}} = \frac{\text{Calor obtenido}}{\text{Calor suministrado}} = 1 - \frac{Q_A}{Q_B} =$$

$$= 1 - \frac{C_p(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_4/T_1 - 1)}{T_2(T_3/T_2 - 1)}$$

Como :

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{P_3}{P_1} \quad \therefore \quad \frac{P_3}{P_2} = \frac{P_4}{P_1}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{k/(k-1)} = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{k/(k-1)}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_2}{T_1} \quad \therefore \quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_4}{T_1} \quad \text{y} \quad \frac{T_3}{T_2} - 1 = \frac{T_4}{T_1} - 1$$

entonces,

$$\eta_{\text{term}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k}}$$

El rendimiento del Ciclo Brayton es, por lo tanto, una función de la relación isentrópica de presión: el rendimiento aumenta

con la relación de presión, pero una mayor relación implica una mayor temperatura máxima  $T_3$ . En la práctica, sin embargo, la temperatura máxima del gas que entra a la turbina es determinada por consideraciones metalúrgicas. Además, conforme la razón de compresión se incrementa a partir de la unidad, el trabajo resultante pasa por un máximo, aunque la eficiencia del ciclo se incrementa continuamente.

La selección de una adecuada relación de compresión para la turbina de gas es, en gran parte, un compromiso entre las demandas de eficiencia y de energía a obtener. El valor numérico de la razón de presión que proporcione el máximo trabajo ideal será claramente, una función de los extremos de temperatura del ciclo.

Para ilustrar más este aspecto del rendimiento térmico de una turbina de gas, se presentan en la figura 5.6. algunas gráficas en las que se pretende mostrar el efecto de la relación de presiones y de la temperatura de entrada en dicho rendimiento. Las curvas están basadas en condiciones ambientales de entrada de  $25^{\circ}\text{C}$  y 300 m de altura, rendimiento del compresor del 85%, rendimiento de la turbina del 90%, rendimiento de la combustión del 95% y una pérdida de presión de la cámara de combustión del 5%

En la tercera de ellas, las curvas se han dibujado para la relación óptima de presiones para cada tipo de ciclo a las dis-

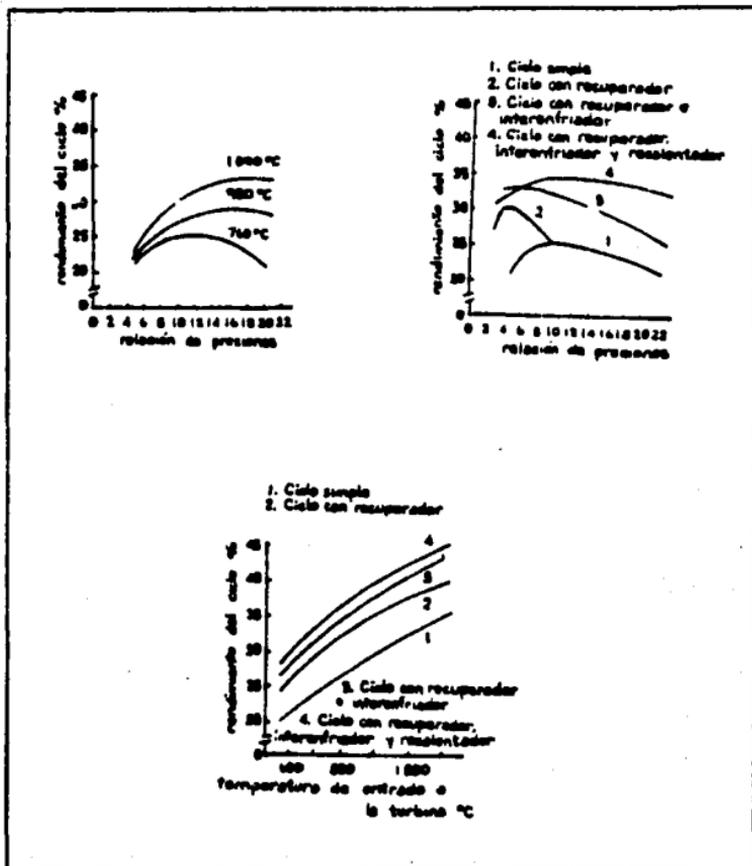


Figura 5.6. Efecto de la relación de presiones en el rendimiento térmico  
 a) Ciclo simple a varias temperaturas de entrada en la tur-  
 bina  
 b) Varios ciclos a temperatura de entrada constan e  
 c) Efecto de la temperatura de entrada en el rendimiento  
 térmico para varios ciclos a la relación de presiones  
 óptima

tintas temperaturas de entrada en la turbina.

En las figuras 5.7 y 5.8, por otra parte, se ejemplifican gráficas que muestran la relación entre la relación de presiones, la temperatura de entrada a la turbina y el consumo de combustible y la potencia.

A partir de los conceptos expresados por el Ciclo Brayton en teoría, en la práctica el ciclo de una turbina de gas puede ser abierto, cerrado o semicerrado.

Todas las máquinas térmicas operan en un ciclo, entendiendo por ciclo la secuencia de transformaciones termodinámicas que sufre el fluido de trabajo de un sistema para que pueda utilizarse su energía. Si es exactamente el mismo fluido el que recorre continuamente la secuencia, entonces el ciclo es cerrado.

El ciclo abierto de una turbina de gas se esquematiza en la figura 5.9, mientras que el ciclo cerrado lo está en la figura 5.10.

Esto implica que los componentes de una turbina deben ser, al menos, un compresor, una "cámara de combustión" en la que se adicione el calor necesario (y que puede consistir en una cámara

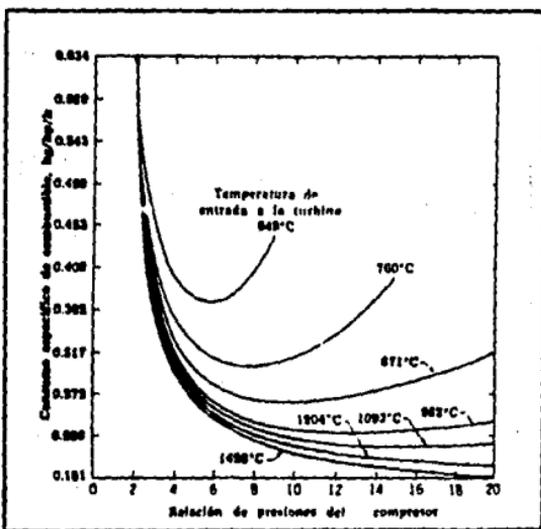


Figura 5.7. Gráfica que muestra el efecto del incremento de la temperatura de entrada a la turbina generadora de gas con consumo específico de combustible a varias relaciones de presiones del compresor

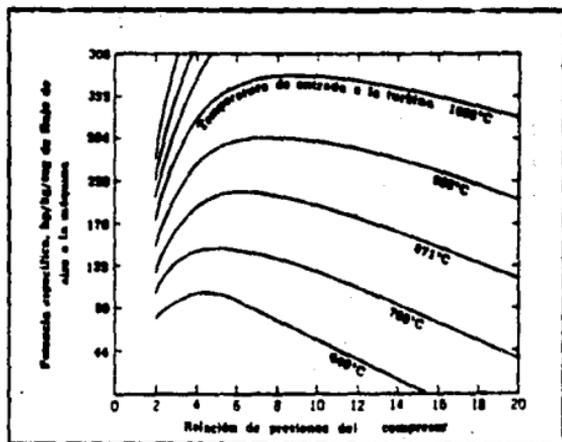


Figura 5.8. Gráfica que muestra el efecto del incremento de temperatura de entrada a la turbina sobre la potencia específica de la máquina a varias relaciones de presiones del compresor.

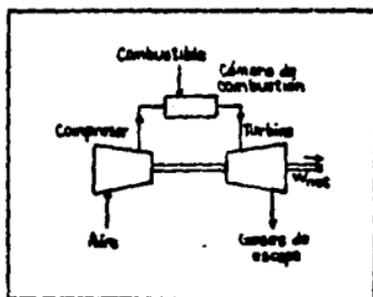


Figura 5.9. Turbina de gas, ciclo abierto

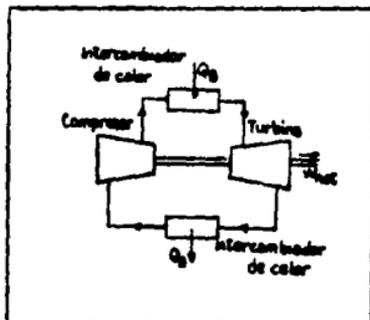


Figura 5.10. Turbina de gas, ciclo cerrado

de combustión propiamente dicha o en un intercambiador de calor; el primer caso corresponde a una unidad operando en ciclo abierto y el segundo a una en ciclo cerrado) y, finalmente, un expansor.

El ciclo abierto de la turbina de gas es el más común; sin embargo, con el advenimiento de los reactores nucleares (que se constituyen en la fuente externa de energía), el ciclo cerrado ha cobrado gran importancia. Todos ellos se detallan más adelante.

En la práctica, la turbina de gas difiere del ciclo ideal a causa de las irreversibilidades en el compresor y en la turbina y debido al descenso de presión en los pasos de flujo y en la cámara de combustión (o en el intercambiador de calor en una turbina en ciclo cerrado).

El efecto de la fricción interna en las turbo-unidades que componen el motor se muestra esquemáticamente en el diagrama T-s de la figura 5.11.

Las irreversibilidades provocan que los procesos de expansión y compresión no sean adiabáticos y que se registre, en consecuencia, un incremento de la entropía.

Una estimación cuantitativa de la fricción en cada componente de la turbina puede hacerse a partir de una estimación de su eficiencia isoentrópica. Esta está definida como la razón entre

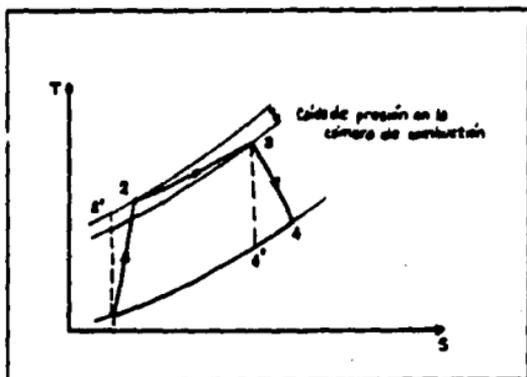


Figura 5.11. Efecto irreversibilidades en los procesos de la turbina de gas

el trabajo realmente obtenido y el trabajo isoentrópico hecho por la turbina, o alternativamente, como la razón entre la verificada y la caída isoentrópica de entalpía del fluido que fluye. Así,

$$\text{Eficiencia isoentrópica de la turbina} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_4'} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_4'}$$

Dado que el compresor tiene un funcionamiento inverso al tenido en la turbina, para obtener la eficiencia isoentrópica del compresor, la razón debe invertirse. Así,

$$\text{Eficiencia isoentrópica del compresor} = \frac{h_2' - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_2' - T_1}{T_2 - T_1}$$

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Un aspecto importante del Ciclo de Brayton es el gran aumento del trabajo de compresión, comparado con el trabajo de la turbina; así el compresor requerirá del 40% al 80% de la potencia generada por la turbina. Esto es particularmente importante cuando se considera el ciclo práctico, ya que el efecto de las pérdidas requiere aumentar el trabajo de compresión, con un pequeño aumento del trabajo de la turbina; de esta manera, el rendimiento total disminuye rápidamente, con el consiguiente descenso en los rendimientos del compresor y de la turbina.

Por esto, la evolución en el diseño de los compresores y de las turbinas de altos rendimientos, es un aspecto importante en la evolución de las turbinas de gas.

En resumen, el rendimiento y la potencia del ciclo real son inferiores a los mismos parámetros del ciclo teórico porque:

- 1) El aire no es un gas perfecto, su calor específico aumenta al crecer la temperatura.
- 2) El medio no es aire puro, en el caso del ciclo abierto, sino gases de la combustión. Esto implica que se aumenta el calor específico del medio, se requiere más cantidad de calor para alcanzar el nivel de energía necesario.
- 3) La cantidad del fluido de trabajo puede cambiar a causa de fugas, inyección de combustible y aire "sangrado" para fines de

refrigeración<sup>1/</sup>

- 4) La compresión no es isentrópica.
- 5) La expansión no es isoentrópica.
- 6) En todo el sistema se producen pérdidas de presión.
- 7) No toda la energía contenida en el combustible es desprendida en la combustión (en el ciclo abierto).
- 8) Hay escapes de energía en la instalación (por lo tanto, no hay procesos adiabáticos).
- 9) La velocidad de escape de los gases, que es parte de la energía aprovechable, no se utiliza, a excepción del caso de las turbinas empleadas en aviones de propulsión a chorro.

Sin embargo, la importancia de plantear este ciclo es que el rendimiento de una máquina en la cual toma lugar un proceso, involucra una comparación entre la utilización actual de la máquina bajo condiciones dadas y la utilización que debería haber sido alcanzada en un proceso ideal. Permite, además, el establecer relaciones funcionales muy importantes para análisis teóricos

### 5.3.1. Ciclo Abierto

En el ciclo abierto básico, el compresor eleva la presión

---

<sup>1/</sup> Los sistemas más empleados para la refrigeración del motor se mencionan más adelante.

del aire que es tomado de la atmósfera, y se adiciona calor a la presión superior quemando un combustible en el aire. Los productos de la combustión, gases a alta temperatura, se expanden entonces en la turbina para producir trabajo. Parte de este trabajo se emplea para operar el compresor que está montado, generalmente, en el mismo eje de la turbina, y el resto para accionar mecanismos externos. Los gases de escape de la turbina son descargados a la atmósfera. La turbina de gas en ciclo abierto se esquematiza en la figura 5.12.

En este tipo de unidades no ha recirculación del agente de transformación en los límites materiales de la planta, estando la entrada y la salida abiertas a la atmósfera. Es por ello que no es un ciclo termodinámico cerrado.

El ciclo abierto ofrece ventajas de un bajo costo y de una elevada relación potencia/peso<sup>1/</sup> (muy importante para los motores aeronáuticos) y se emplea sin necesidad de agua de enfriamiento (esta operación es realizada con aire proveniente del compresor) Además, tiene una regulación simple y un sistema de arranque y parada sencillo. La mayoría de las instalaciones de turbinas de gas son de este tipo.

---

<sup>1/</sup> En las máquinas en que el aire es el fluido de trabajo, éste no sólo actúa como un vehículo para el transporte de energía, sino también como un medio para mantener la combustión interna. Esto da como resultado una máquina de diseño compacto que tiene una elevada razón potencia/peso.

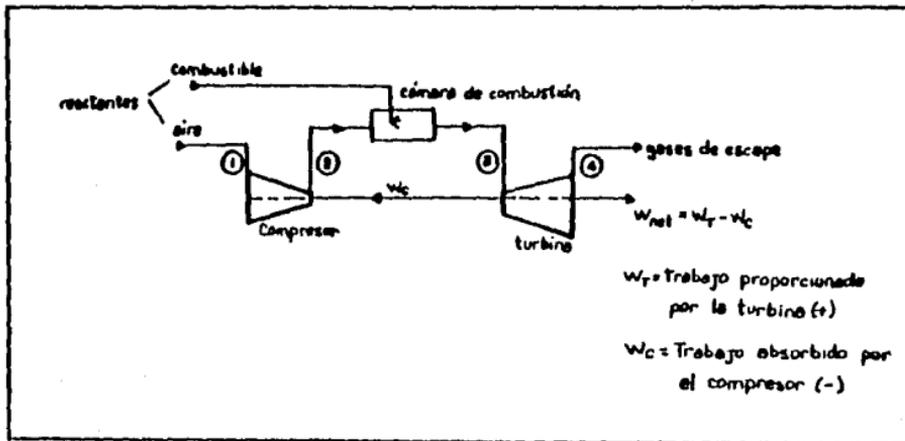


Figura 5.12. Turbina de Gas, Ciclo Abierto

Las desventajas que se pueden mencionar son:

Todas las partes móviles están sometidas a la acción corrosiva o erosiva del combustible y de sus productos de combustión, particularmente cuando el combustible utilizado contiene un alto porcentaje de azufre, vanadio y cenizas. Por otra parte, el empleo de baja presión y la gran cantidad de aire en exceso necesaria para reducir la temperatura de los gases de combustión lo bastante para satisfacer las exigencias de los materiales con que se encuentra hecha la turbina, requieren la utilización de un compresor y conductos de gas de gran sección. Todo esto es costoso y limita la capacidad de las turbinas en ciclo abierto.

#### 5.3.2. Ciclo Cerrado

En la turbina de ciclo cerrado se recircula prácticamente todo el fluido de trabajo (excepto las pérdidas en las juntas, por fugas y alguna adición o extracción por necesidades de regulación) de manera continua.

El calor suministrado proviene de una fuente externa (de combustión o de una reacción nuclear); se transfiere al fluido de trabajo proveniente del compresor por medio de un intercambiador de calor. El fluido debe ser enfriado después de salir de la turbina y antes de que entre al compresor para empezar de nuevo el ciclo. Esta necesidad aumenta la complejidad de la operación. El ciclo

cerrado se ilustra esquemáticamente en la figura 5.13.

Las ventajas que se pueden mencionar de este ciclo son:

- 1) La posibilidad de emplear como fluidos de trabajo aire, helio, bióxido de carbono, nitrógeno, etc.
- 2) Los productos de la combustión no pasan directamente a través de la turbina lo que disminuye problemas de obstrucción, corrosión y erosión. Esto permite, además, que puedan utilizarse como combustible aceites de baja calidad o carbón pulverizado.
- 3) La posibilidad de regular la presión y la composición del fluido de trabajo a las condiciones que permitan obtener una operación más eficiente. Es posible tener elevada presión y densidad del fluido lo que permite aumentar la capacidad de potencia de una turbina de volumen dado.
- 4) Al variar el nivel de presión absoluta a la entrada del compresor, se varía el peso de fluido circulado sin variar la relación de compresión o las temperaturas, lo que da lugar a un rendimiento relativamente constante en una amplia variedad de cargas.

Los últimos dos puntos se explican porque cuando se trabaja con un fluido de características bien definidas y no variables, se puede aproximar el ciclo real a uno teórico. Esto no sucede cuando se trabaja con gases de combustión que tienen características físicas y químicas que varían continuamente en intervalos muy amplios.

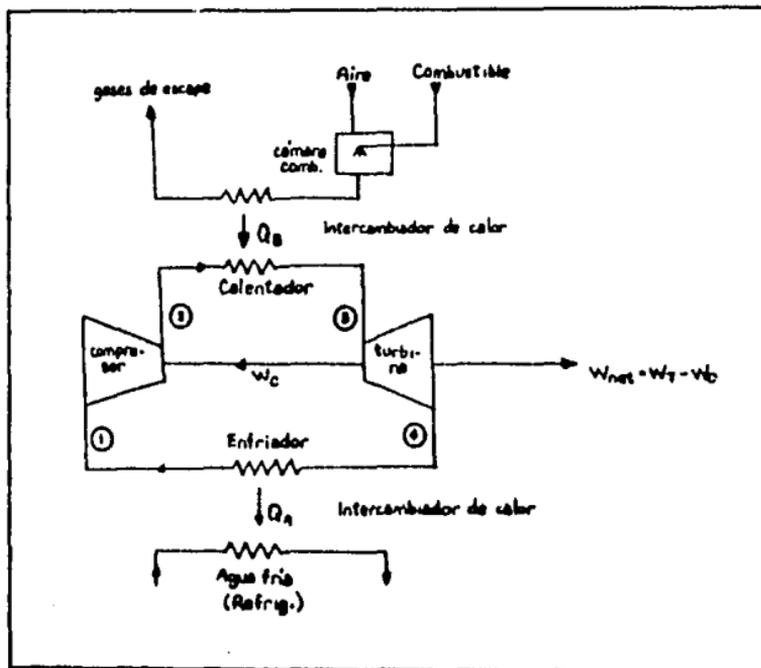


Figura 5.13. Turbina de gas, ciclo cerrado

El mayor inconveniente de la instalación de una turbina de gas de ciclo cerrado, es el elevado costo y dimensiones del intercambiador de calor de alta temperatura<sup>1/</sup>. Otra desventaja importante es la gran cantidad de agua necesaria para el enfriamiento.

### 5.3.3. Ciclo Semicerrado

En la turbina de gas de ciclo semicerrado, sólo una parte del fluido de trabajo se recircula.

Este tipo necesita un preenfriador para los gases de recirculación y una bomba de compresión para suministrar el aire necesario para la combustión.

La ventaja de este ciclo es que puede trabajar con altas densidades del fluido de trabajo.

Las desventajas son la corrosión y las incrustaciones que se producen con la recirculación de los productos de la combustión, especialmente cuando los combustibles utilizados tienen un elevado porcentaje de azufre y ceniza.

El ciclo semicerrado se ilustra esquemáticamente en la figu-

---

<sup>1/</sup> Es necesario recordar que la eficiencia de un intercambiador de calor se encuentra en relación directa con la superficie de tubo (de contacto) que se proporcione

ra 5.14.

#### 5.3.4. Modificaciones al ciclo básico

El ciclo abierto básico de una turbina de gas puede modificarse por la adición de intercambiadores de calor y otros muchos elementos por razones de rendimiento, potencia obtenida y características de la operación.

Los tres modos básicos en los cuales la eficiencia de un ciclo normal para una turbina de gas puede ser incrementada son:

- 1) incrementando el trabajo obtenido de la turbina;
- 2) disminuyendo el trabajo proporcionado al compresor;
- 3) disminuyendo la cantidad de calor proporcionada por el combustible.

El primero de los objetivos mencionados puede ser alcanzado al dividir el proceso de expansión en 2 o más etapas. Esta división puede lograrse empleando una turbina de alta presión y una de baja presión, con una cámara de combustión entre ellas para recalentar el aire y los productos de la combustión. El efecto es el incremento del volumen del gas mientras ocurre la expansión, con ello se logra un incremento en el trabajo obtenido de la turbina.

El ciclo consistiría entonces en la expansión parcial de

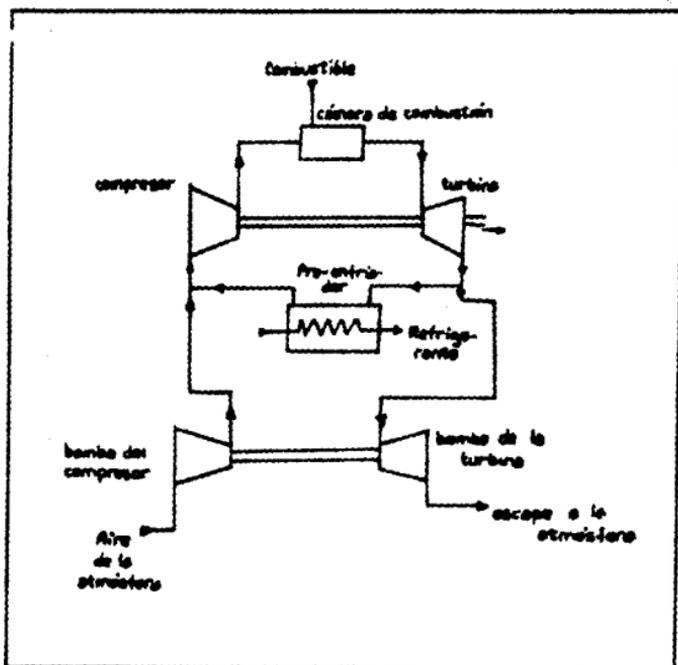


Figura 5.14. Turbina de gas, ciclo semicerrado

los gases a una presión intermedia, seguida de su admisión a una cámara de combustión para recalentarlo; en esta cámara se quema combustible a presión constante.

Las elevadas razones aire/combustible manejadas por la turbina de gas en ciclo abierto aseguran que se dispone de suficiente oxígeno libre para soportar un proceso de combustión secundaria. La ganancia en trabajo se muestra, en la figura 5.15, representada por el área 4-5-6-7 que puede ser considerado como un ciclo subsidiario de menor razón de presión que el ciclo básico.

El incremento en el trabajo neto obtenido, sin embargo, tiene que ser contrapesado contra pérdidas en la eficiencia térmica total, no obstante, la incorporación de un intercambiador de calor puede superar la pérdida.

El segundo objetivo puede lograrse por la compresión del aire en la manera más isotérmica (temperatura constante) posible.

El intento práctico que más se acerca al objetivo es el empleo de enfriamiento intermedio, proceso en el cual el aire es comprimido en dos o más etapas y enfriado a presión constante, hasta la temperatura de entrada entre las diferentes etapas. El propósito de esto es mantener el volumen de aire lo más bajo posible para reducir la potencia requerida para la compresión.

En la figura 5.16 se muestra cómo para una máquina equipada

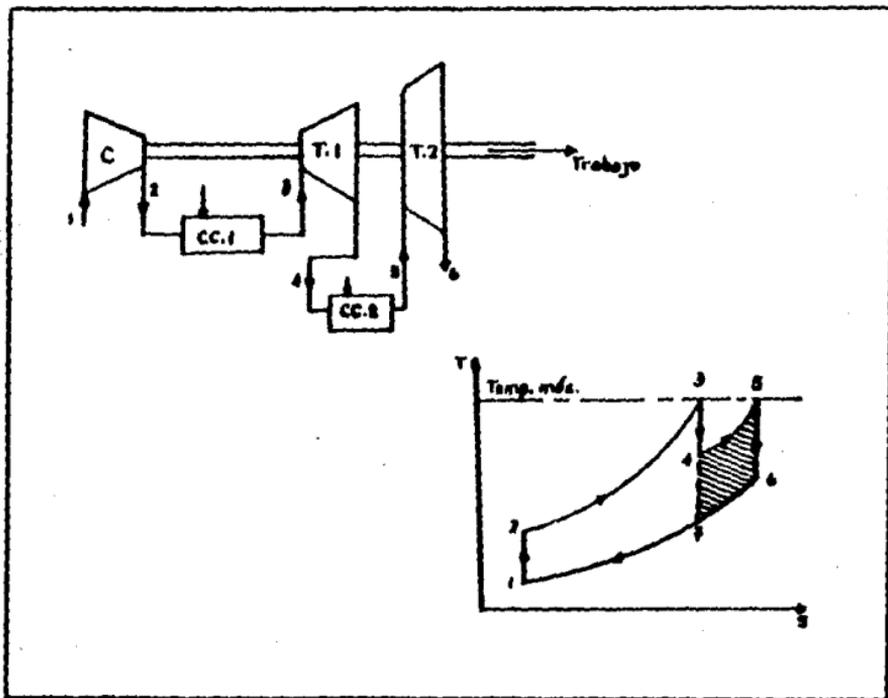


Figura 5.15.

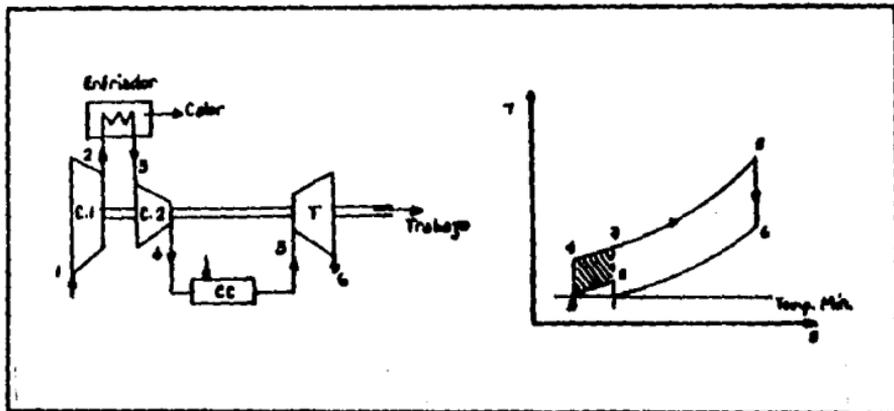


Figura 5.16

con un compresor de dos etapas, el trabajo obtenido se incrementa en una cantidad equivalente al área 2-3-4-7. Esta área representa, en efecto, un ciclo menor a presión constante unido al ciclo base 1-7-5-6

Como la razón de presión del ciclo menor es necesariamente menor que la del ciclo básico, la eficiencia termal total del sistema se reduce por debajo del valor básico. La adición posterior de un intercambiador de calor podría, sin embargo, evitar esta tendencia a la disminución de la eficiencia térmica; esto porque el calor suministrado durante la operación 4-7 podría provenir de la energía de desperdicio.

El alcance del tercer objetivo puede ser posible empleando un intercambiador de calor como se muestra a continuación.

Las turbinas de gas en ciclo abierto básico descargan un elevado volumen de gases calientes.

Es posible recuperar mucha de la energía contenida en esos gases haciéndolos pasar a través de un intercambiador de calor (llamado regenerador) antes de descargarlos a la atmósfera; la energía obtenida de estos productos de desperdicio puede entonces ser transferida al aire comprimido antes de que entre a la cámara de combustión. De este modo, la cantidad de combustible que se requiere

quemar para alcanzar la misma temperatura de combustión se reduce; de esa manera la eficiencia termal es incrementada sin alterar el trabajo producido. (Véase figura 5.17.)

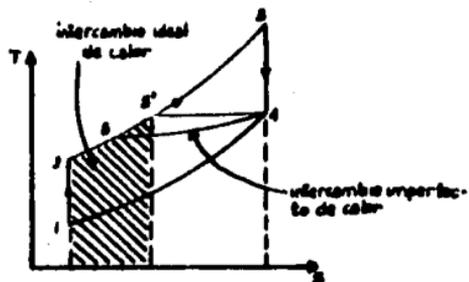
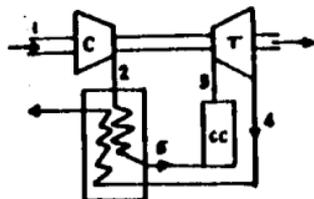
El intercambiador de calor puede ser introducido con utilidad sólo cuando la temperatura de los gases después de la expansión exceden la del aire después de la compresión; de otro modo, la incorporación de un intercambiador de calor podría ser más perjudicial que útil.

También es posible una combinación de: intercambio de calor, enfriamiento intermedio y recalentamiento.

Si un ciclo regenerativo pudiera ser equipado con un elevado número de etapas de compresión y expansión, entonces los procesos de transferencia de calor de y desde el ciclo tendrían lugar aproximadamente en forma isotérmica como se muestra en la figura 5.18.

Si, en el límite, un número infinito de etapas de compresión y expansión pudieran incorporarse, entonces todo el calor suministrado al ciclo podría estar a la temperatura máxima, mientras que todo el calor rechazado podría estar a la temperatura mínima. La eficiencia de este ciclo sería entonces igual a la de la máquina de Carnot y el ciclo sería identificado con el Ciclo de Ericsson.

En este ciclo, que se ilustra en la figura 5.19, el calor



Eficiencia de un intercambiador de calor =  
 = razón termal =  $\frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_2}$

Figura 5.17.

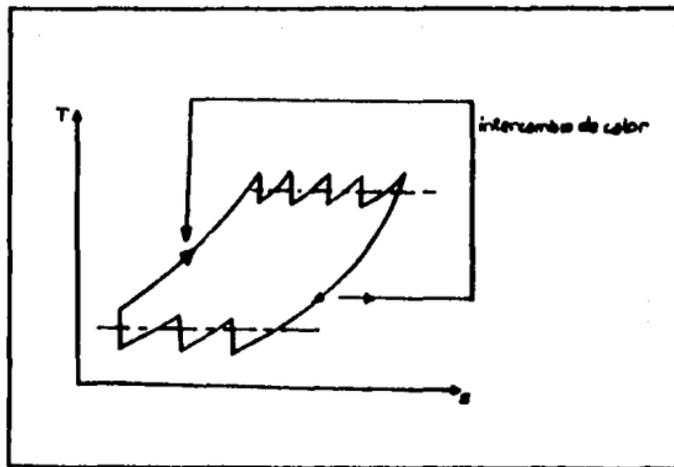


Figura 5.18.

se transmite al fluido de trabajo durante el proceso a presión constante 2-3 y durante la expansión isotérmica 3-4. El calor es cedido durante el proceso a presión constante 4-1 y durante la compresión isotérmica 1-2.

A pesar de que en esta forma es posible incrementar la eficiencia térmica de una planta de turbina de gas, las desventajas de la complejidad adicionada por los equipos añadidos y los costos que todo ello representa, no valen el incremento en eficiencia.

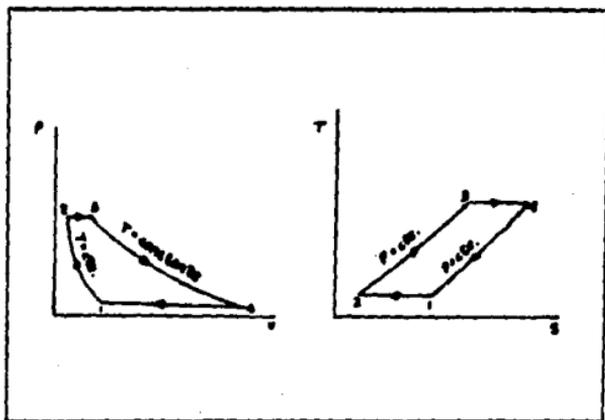


Figura 5.19. Ciclo de Ericsson

## 6. Combustión

Es importante el establecer algunas consideraciones básicas y generales sobre el proceso de combustión y los combustibles mayormente empleados hasta ahora. Para el caso de los combustibles utilizados en la turbina de gas se dedica un apartado posterior.

### 6.1. El proceso de combustión

El proceso de combustión consiste en la quema u oxidación de una materia combustible (esto es, en la unión del oxígeno con un elemento combustible (carbono y/o hidrógeno)) con el objeto de liberar la energía química contenida en el combustible.

En esta reacción intervienen dos componentes esenciales: el combustible (elemento oxidable)<sup>1/</sup> y el comburente (elemento oxidante).

La mayor parte de los procesos de combustión se llevan a efecto con aire y no con oxígeno puro. El aire está formado por varios elementos, en particular oxígeno, nitrógeno y argón, así

---

<sup>1/</sup> El valor útil de un combustible se encuentra, en importante medida, en función de su potencia calorífica, la cual se define como la energía liberada por unidad de peso o de volumen del combustible. Para los combustibles sólidos o líquidos la potencia calorífica<sub>3</sub> se expresa en kcal por kg, y para los gaseosos en kcal por m<sup>3</sup> de gas medido a una temperatura de 15.6°C y a presión absoluta de 762 mm de Hg

La potencia calorífica de un combustible puede determinarse por cálculos o bien mediante el empleo de un calorímetro. Esta potencia depende de la composición del combustible y de las impurezas presentes en el mismo, como se ejemplifica más adelante con el carbón.

como por algunos otros vapores y gases inertes; su composición volumétrica es de aproximadamente 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno y 1% de argón (estos últimos elementos no intervienen en la reacción química de la combustión, pero debe tenerse en cuenta su presencia).

Se dice que una oxidación es completa cuando el combustible es totalmente oxidado y se libera toda la energía. Si esto no ocurre, se dice que es incompleta.

La cantidad mínima de aire necesaria para oxidar completamente los reactivos se conoce con el nombre de aire teórico. Hipotéticamente, cuando la combustión se lleva a cabo con el aire teórico ocurre íntegramente. En la práctica, esto resulta imposible. Se necesita más oxígeno del teóricamente necesario para lograr la oxidación (combustión) total de los reactivos. Se requiere entonces de un exceso de aire, pues cada porción de combustible debe hallarse completamente rodeada por un número de moléculas de oxígeno mayor que el necesario, para asegurar la oxidación de todas las moléculas del hidrocarburo. Este exceso de aire generalmente se expresa como un porcentaje del aire teórico.

Si el exceso de aire es insuficiente para permitir una combustión completa, entonces no todo el carbono se oxidará a la forma de dióxido de carbono, sino que una parte resultará como monóxido de carbono (si un combustible hidrocarbónico se oxida por completo,

los productos resultantes son dióxido de carbono y agua). Cuando haya una cantidad considerablemente menor de aire teórico aparecerán hidrocarburos no quemados en los productos. Estos producen el hollín o humo negro que en ocasiones arrojan las chimeneas. Lo anterior sucede cuando no se cumplen una o más de las condiciones que se requieren para una combustión completa y que son :

- 1) la mezcla de combustible y aire debe hallarse a la temperatura de ignición (temperatura mínima a la cual el proceso ocurre);
- 2) tiene que haber oxígeno suficiente para asegurar una oxidación completa;
- 3) el oxígeno debe encontrarse en contacto íntimo con el combustible.

De acuerdo con la composición del combustible a emplear en un proceso de combustión, se debe determinar la relación entre aire y combustible necesaria para que se registre una combustión completa.

Los gases de escape de una cámara donde se haya verificado una combustión, se denominan productos de la combustión. La composición de estos productos depende del tipo de combustible empleado; de la relación aire/combustible (utilizada mucho para indicar la riqueza o pobreza de una mezcla de combustibles y aire); y de las condiciones en que se efectúa la combustión. Generalmente, contie-

nen anhídrido carbónico, óxido de carbono, oxígeno, nitrógeno, carbono libre, cenizas ligeras, vapor de agua, anhídrido sulfuroso e hidrocarburos no quemados. La mayoría de estos productos son invisibles.

En equipos en los que se utilizan grandes cantidades de combustibles, es importante que la quema sea lo más eficaz posible. Incrementos de eficiencia relativamente pequeños (aún de 1%) pueden ahorrar enormes cantidades de dinero. Un factor que afecta a la eficiencia de la combustión, como ya se ha mencionado, es la cantidad de exceso de aire. Si no se emplea suficiente aire la combustión será incompleta y no se utilizará toda la energía química del combustible. Si se usa demasiado aire, el calor que se libere por la combustión se desperdiciará en calentar el aire excesivo. El objeto es oxidar completamente el combustible con la menor cantidad de aire; esto dará como resultado la mayor liberación de energía por unidad de masa de aire. Diversos análisis de los productos de la combustión indican si el objeto se está logrando o no.

Cuando la oxidación es completa en un proceso de combustión y no exista trabajo, transmisión de calor o cambio alguno en las energías cinética y potencial, entonces se considera que la máxima cantidad de energía química del combustible se ha convertido en energía térmica; esta eleva la temperatura de los productos de la combustión, por lo que en tales condiciones, es máxima la temperatu-

ra de esos productos. Esta temperatura recibe el nombre de temperatura de combustión adiabática.

## 6.2. Combustibles

Generalmente, los combustibles empleados son los llamados "combustibles fósiles", en su forma sólida, líquida o gaseosa. Los principales y su proceso esquemático se ilustran en la figura 6.1.

La forma más importante de combustible fótil sólido es el carbón, que se extrae de las minas en diferentes variedades, que van desde la antracita (carbón duro), hasta las diversas clases de hulla bituminosa.

El carbón mineral es una mezcla de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, agua y un material sólido no combustible: la ceniza

A excepción del carbono y el hidrógeno, los demás componentes se consideran impurezas ya que no tienen valor como combustible, su presencia rebaja la potencia calorífica del combustible y pueden ocasionar problemas (formación de escorias, erosión, corrosión, etc.) en su utilización<sup>1/</sup>.

---

<sup>1/</sup> La influencia de las impurezas en el carbón puede esquematizarse como sigue:

La humedad no tiene valor como combustible. Al evaporarla se produce una pérdida de calor que se escapa con los productos de la combustión.



En general, los combustibles sólidos contaminan la atmósfera por emisión de humo, arena y cenizas volantes.

Debido a que el carbono no tiene una composición uniforme, es necesario analizarlo químicamente para conocer su potencia calorífica. Esta última evaluación puede expresarse de 3 maneras distintas: 1) sobre el carbón tal como se recibe o quema; 2) sobre el carbón seco o exento de humedad; y 3) sobre el carbón sin cenizas ni humedad. El análisis químico de los carbones de los EUA se muestra en el cuadro 6.1. Por "materia volátil" se denomina a todos los compuestos que se evaporan a baja temperatura cuando se calienta el carbón.

Entre los combustibles fósiles líquidos (hidrocarburos líquidos), se pueden mencionar el alcohol, la gasolina, el keroseno y el combustóleo ("fuel\_oil"), que se obtienen mediante la destila-

---

Las cenizas rebajan la potencia calorífica del combustible y su extracción de los hogares resulta costosa. Dificultan la transmisión de calor y tienden a tapar los huecos de aire del lecho de combustible, con lo cual disminuye la cantidad de calor que puede quemarse por hora. Además, las cenizas de ciertos carbones funden a temperaturas relativamente bajas formando escorias, las cuales deterioran los revestimientos de los hogares y originan el consiguiente gasto de su extracción.

El azufre no tiene su plena potencia calorífica si no se halla en estado libre. En forma de sulfato no tiene interés como combustible. En grandes cantidades es muy probable que forme escorias muy molestas y que los productos de su combustión corroan los metales.

El oxígeno rebaja la potencia calorífica del combustible. El nitrógeno es inerte desde el punto de vista químico y análogamente a las cenizas disminuye la cantidad de energía disponible por tonelada de combustible.

CUADRO 6.1. Análisis Químico de los Carbones de los Estados Unidos  
(Datos sacados del U.S. Bureau of mines, Bulletin 22)

Clase de carbón	Estado	Distrito	Muestra	Análisis inmediato, carbón tal como se recibe, porcentajes				Análisis químico, carbón tal como se recibe, porcentajes				Potencia calorífica (Btu por lb)		
				Humedad	Materia volátil	Carbono fijo	Cenizas	Ástrib	Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Porcentaje de volátiles	Base
Antracita	Colorado	Gunnison	Mina	2,70	3,32	88,15	5,83	0,80	85,39	2,98	1,19	1,17	7831	8049
Antracita	Pennsylvania	Jackson mta.	Vagóneta de menudo	0,41	7,02	71,79	18,78	4,74	72,63	2,60	2,10	0,77	6892	7078
Antracita	Pennsylvania	Schuykill	Mina	3,80	1,10	88,21	7,83	0,49	81,76	1,68	1,81	0,83	7367	7601
Semiantracita	Colorado	Gunnison	Mina	4,68	6,96	81,87	6,31	0,41	79,66	3,43	3,00	1,93	7482	7682
Semiantracita	Pennsylvania	Sullivan	Mina	3,35	8,47	76,66	11,60	0,63	76,43	3,20	3,06	1,00	7308	7664
Semibituminoso	Maryland	Allegany	Vagóneta sacada de mina	3,47	17,65	71,84	7,09	0,81	80,17	3,34	8,69	1,48	7666	8166
Semibituminoso	Pennsylvania	Cambria	Vagóneta sacada de mina	3,61	10,87	73,04	0,63	0,94	80,70	4,17	2,79	1,26	7932	8221
Semibituminoso	Virginia del Oeste	Layette	Vagóneta sacada de mina	3,62	21,28	68,76	8,00	0,68	78,71	4,45	4,33	1,31	7778	7978
Semibituminoso	Virginia del Oeste	McDowell	Compuerto de mina	3,60	18,00	70,30	3,21	0,61	84,39	4,20	2,73	1,38	8321	8518
Bituminoso	Alabama	Bibb	Mina	3,10	31,08	69,88	0,23	1,20	78,28	4,98	4,78	1,37	7655	8111
Bituminoso	Colorado	Boulder	Vagóneta sacada de mina	18,68	24,88	60,48	8,90	0,68	67,66	3,99	12,18	1,16	6636	6928
Bituminoso	Illinois	Franklin	Mina	11,60	26,70	57,07	9,13	0,60	65,40	6,01	8,79	1,08	6320	7161
Bituminoso	Illinois	Sangamon	Vagóneta sacada de mina	10,00	37,41	37,82	13,71	4,65	63,89	2,77	7,63	0,91	6222	6872
Bituminoso	Illinois	Williamson	Mina	2,88	21,20	49,89	11,63	2,98	68,80	4,28	4,20	1,06	6923	7090
Bituminoso	Indiana	Green	Vagóneta sacada de mina	10,20	30,21	41,84	11,76	4,23	61,96	4,74	7,42	1,06	6231	6988
Bituminoso	Kansas	Crawford	Vagóneta sacada de mina	14,21	23,17	37,49	16,27	4,66	64,09	9,93	6,89	1,31	6660	6487
Bituminoso	Kentucky	Hopkins	Vagóneta sacada de mina	4,99	32,68	49,36	12,95	1,29	67,34	4,43	4,91	1,08	6800	7186
Bituminoso	Missouri	Clay	Vagóneta sacada de mina	7,92	36,08	46,83	10,04	3,82	66,29	4,61	7,20	1,40	6478	7287
Bituminoso	Missouri	Clay	Compuerto de mina	16,83	32,60	41,40	9,91	2,97	66,63	4,08	7,64	1,08	6988	7009
Bituminoso	Oklahoma	Hocking	Mina	9,72	37,41	53,41	4,43	0,64	69,60	4,62	0,94	1,26	6803	7520
Bituminoso	Oklahoma	Attalbug	Mina	2,09	27,89	60,76	10,07	6,73	63,60	4,73	2,89	1,33	6469	6620
Bituminoso	Pennsylvania	Layette	Vagóneta sacada de mina	6,12	27,87	68,29	8,71	0,80	73,13	4,34	6,23	1,80	7674	7896
Bituminoso	Pennsylvania	Westmoreland	Vagóneta sacada de mina	3,39	21,79	60,16	8,36	1,08	74,67	6,9	0,70	1,39	7610	7876
Bituminoso	Tennessee	Campbell	Vagóneta sacada de mina	6,38	24,64	63,03	7,04	1,99	72,41	6,90	7,68	1,72	7248	7689
Bituminoso	Virginia	Lee	Vagóneta sacada de mina	4,06	34,93	66,28	4,73	1,20	70,66	4,87	7,31	1,24	7081	8006
Bituminoso	Virginia del Oeste	Kanawha	Vagóneta sacada de mina	2,82	22,20	66,96	8,03	1,38	79,74	4,85	6,81	1,34	7647	7889
Bituminoso	Virginia del Oeste	Mingo	Vagóneta sacada de mina	2,86	23,23	68,08	6,83	0,67	78,38	4,68	6,14	1,43	7333	8066
S <sup>1</sup> bituminoso	Colorado	Boulder	Mina	19,18	30,87	41,27	6,76	0,98	65,38	9,0	13,48	1,08	6362	6607
Subbituminoso	Washington	King	Mina	15,81	31,17	38,64	12,73	0,37	62,11	10,00	12,74	1,08	6184	6284
Lignito	Washington	McLean	Mina	26,90	31,92	24,37	7,76	1,18	41,43	2,84	8,96	1,81	3997	4332
Lignito	Dakota del Norte	Williams	Vagóneta sacada de mina	28,97	26,84	30,16	8,39	0,48	39,31	2,66	12,63	0,88	3743	6130
Lignito	Texas	Wood	Vagóneta sacada de mina	32,71	29,28	29,76	7,28	0,87	49,82	2,04	13,12	0,78	4009	6160
Lignito	Wyoming	Sheridan	Mina	29,33	29,68	38,42	8,67	1,31	46,09	2,01	14,00	0,89	4319	6118

ción del petróleo, y al propio petróleo crudo. La mayoría de ellos presentan ciertas ventajas sobre el combustible sólido: mayor limpieza en la combustión, y fácil manejo y almacenamiento. Además, en general, al no tener el problema de la eliminación de impurezas, característico de los combustibles sólidos y que disminuyen su potencia calorífica, como ya se ha mencionado y destacado, producen una notable cantidad de energía en relación a su peso. Por ejemplo, un kilogramo de gasolina produce un 25% más de energía que la producida por un kilogramo de carbón.

La fórmula química general de los hidrocarburos líquidos es  $C_xH_y$ ; los valores de los subíndices  $x$  y  $y$  dependen de la familia de hidrocarburos en cuestión.

Cualquier combustible en realidad es una mezcla de varias sustancias hidrocarbónicas. De ésta y de su grado de pureza depende la utilización de un determinado hidrocarburo líquido. Las propiedades más importantes de los hidrocarburos conocidos se muestran en el cuadro 6.2.

Algunos de los combustibles como el petróleo crudo y los residuos pesados de la destilación (fuel\_oil), (se mencionan los principales en el cuadro 6.3.) aunque son más baratos, presentan la desventaja de una elevada viscosidad y la presencia de materiales corrosivos como el azufre, sodio, potasio y vanadio. También tienen la tendencia de formar partículas de coque debido a su combustión incompleta que posteriormente ocasionan daños por erosión. Sin embargo, se estudian y se aplican ya algunos procedimientos para

Cuadro 6.2. Propiedades de los Hidrocarburos

	Elemento	Temperatura °C			Densidad		Potencia calorífica			Cálculo en kcal por kg	Valoración en octano	Número de octanación (ind. FEP por galón U.S. = 3,785 litros)		Pecuniación en %	
		Fusión	Ebullición	(41°)	líquida	API	Superficie					Normal(1)	Rica		
							por kg	por kg	por m <sup>3</sup>						
Parafinas C <sub>1</sub> H <sub>2n+2</sub> saturadas	Gas	Metano.....	-182	-161	730	0,424	205,8	13 219	11 977	774	138	110(2)	...	...	18,0
		Etano.....	-172	-88	665	0,840	194,0	12 444	11 442	721	91	104(2)	...	...	30,0
	Gas LP	Propano.....	-186	-42	534	0,882	142,9	17 027	11 119	874	93	100	...	...	44,0
		Butano.....	-138	-0,66	816	0,870	116,8	11 877	10 956	844	91	92	...	...	86,1
	Gasolina	Pentano.....	-129	30	600	0,626	94,5	11 721	10 498	849	89	81	83	83	72,1
		n-Heptano.....	-91	99	478	0,684	76,8	11 883	10 797	867	72	0	700	360	100,0
		Triptano.....	-26	81	...	0,690	...	...	10 810	...	89	...	...	...	114,2
		Isó Octano.....	-107	59	722	0,692	73,8	11 433	10 642	850	71	100	183	183	142,2
		Decano.....	-30	174	461	0,730	67,8	11 414	10 659	859	69	...	...	...	170,2
		Undecano.....	-10	214	...	0,749	67,5	11 416	10 681	862	69	...	...	...	220,4
Fuel oil	Dodecano.....	18	240	...	0,774	61,5	11 344	10 692	862	...	100	...	...	248,8	
	Octadecano.....	27	307	...	0,782	49,6	11 333	10 681	866	...	...	...	...	...	
Olefinas C <sub>1</sub> H <sub>2n</sub> cadena no saturada	Propeno.....	-185	47	...	0,81	103,0	11 660	10 608	869	...	86	...	...	42,1	
	Buteno-1.....	-194	-6	...	0,820	...	11 812	10 749	873	...	82	86	...	86,1	
	Hexeno-1.....	-128	67	...	0,874	76,0	10 683	9 867	856	92	84,1	...	...	84,1	
Nafénos Anillo saturado	Ciclohexano.....	94	49	...	0,740	66,7	10 432	9 718	837	...	83	100	> 180	70,1	
	Ciclohexano.....	8	80	...	0,774	61,6	10 353	9 683	837	86	71	84	130	84,1	
Aromáticos Anillo no saturado	Benceno.....	6	80	730	0,86	59,0	10 086	9 649	861	91	110(2)	84	> 180	78,1	
	Tolueno.....	96	110	811	0,87	31,0	10 166	9 690	861	86	104(2)	94	> 180	92,1	
	Xileno.....	26	140	...	0,86	31,0	10 277	9 722	868	80	104(2)	...	...	106,7	
Alcoholes	Metanol.....	81	65	...	0,792	46,4	8 424	8 022	801	279	98	> 180	> 180	32,0	
	Etanol.....	117	78	...	0,795	47,1	7 099	6 416	876	278	99	> 180	> 180	49,0	
Tetraetil plomo	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> Pb	-176	182	...	1,653	...	...	...	...	40	...	...	...	...	
Hidrogeno (gas)	H <sub>2</sub>	0	...	...	0,089	...	...	2 398	...	...	...	...	...	...	
Aguá	H <sub>2</sub> O	0	100	...	...	...	...	...	...	139	...	...	...	18,0	
Carbono sólido	C	-60	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
Gasolina (normal)		-60	43 149	...	...	...	...	10 658	...	...	14(2)	10	93	...	
Óxido de carbono	CO	-191	608	...	...	...	2 114	2 414	...	...	...	...	...	88,0	

(1) A volumen constante, a 25°C y a una presión de 1,013 kg por cm<sup>2</sup> (presión absoluta).

(2) La temperatura de autoignición (TAI) es aquella temperatura a la cual el combustible a presión ambiente sin ser calefado ninguna llama o chispa.

(3) Aprominado.

(4) Sin tetraetil plomo.

Cuadro 6.3 (a) Análisis de Aceites Americanos Típicos (1)

Emplazamiento	Propiedades físicas				Propiedades químicas				
	Densidad API a 15,0 °C	Densidad específica a 15,0 °C	Punto de inflamación, °C	Punto de combustión, °C	C Carbono	H Hidrogeno	O Oxigeno	S Azufre	Potencia calórica kcal por kg
Crudo de California, ....	14,3	0,937	76	99	86,66	11,61	0,74	0,82	10 260
Crudo de Pensilvania, ....	39,6	0,826	...	...	82,60	14,80	2,70 <sup>(2)</sup>	...	9 850
Crudo de Virginia occidental	36,7	0,841	...	...	84,36	14,10	1,60 <sup>(2)</sup>	...	10 221
Crudo de Texas, ....	22,3	0,920	61	83	84,60	10,90	2,87 <sup>(2)</sup>	1,63	10 888
Crudo de Oklahoma, ....	20,3	0,903	129	141	87,93	11,37	0,19	0,41	10 916
Fuel de Texas, ....	21,3	0,902	102	118	83,26	12,41	3,83	0,50	10 822
Fuel de Pensilvania, ....	29,2	0,866	...	...	84,00	13,70	1,40 <sup>(2)</sup>	...	10 654

(1) STEPHEN D. ANDRUS, *Fuel oil in Industry*.

(2) Nitrógeno incluido.

Cuadro 6.3 (b) Especificaciones del Fuel\_oil

Combustible (fuel)	Índice de Cetano	Viscosidad a 50°C según ASTM D 445	Agua y sedimentos, por ciento	Residuo de carbón, por ciento	Centros, por ciento	Punto de inflexión, en °C	Azufre, por ciento	Destilación ASTM, °C				Índice del API	Punto de ebullición, °C
								Punto de ebullición	10 por ciento	50 por ciento	Punto final		
Aceite para hornos, tipo medio, marca Sun Oil.....	24-36	0,10	0,10	0,0	...	62 <sup>(1)</sup>	0,16 <sup>(1)</sup>	170 <sup>(1)</sup>	270 <sup>(1)</sup>	350 <sup>(1)</sup>	380 <sup>(1)</sup>	34-39	-14 <sup>(1)</sup>
Diesel oil ligero, marca Sun Oil.....	47 <sup>(1)</sup>	0,10 <sup>(1)</sup>	0,10 <sup>(1)</sup>	0,05 <sup>(1)</sup>	...	57 <sup>(1)</sup>	0,16 <sup>(1)</sup>	202	230	335	374	27-32	-17
Phillips Pet N.º 2.....	...	0,02 <sup>(1)</sup>	...	...	...	88	...	...	225 <sup>(1)</sup>	310 <sup>(1)</sup>	...	30-32	...
Phillips Pet N.º 3.....	71 <sup>(1)</sup>	0,1	...	...	...	93	...	...	230 <sup>(1)</sup>	326 <sup>(1)</sup>	...	26-32	...
Supertlames sinclair:													
380.....	50	0	0,02	Traza	...	68	0,6	216	220	279	316	24-28	-17
388.....	50	0	0,2	0	...	63	0,75	199	201	273	357	26-30	-18
(Invierno) 388.....	50	0	0,1	0	...	64	0,75	182	216	320	349	27-40	Por ensayo -17
Diesel Unión Oil.....	56	0,08	0,08	0	...	83	0,65	...	...	...	...	22,5	-17
Servicio urbano:													
Mass N.º 2.....	...	0,06 <sup>(1)</sup>	0,06	...	...	71	0,78	...	226 <sup>(1)</sup>	326 <sup>(1)</sup>	380 <sup>(1)</sup>	...	-17
Mass N.º 3.....	70	0,1 <sup>(1)</sup>	0,16	...	...	83	0,78	...	...	326 <sup>(1)</sup>	...	...	-18
Diesel especial { N.º 3.....	49	0,05	0,06	0	...	85	0,16	168	226	293	326	26,5	-18
{ N.º 1.....	55	0,05	Traza	0	...	...	0,073	180	210	306	366	26,6	Por ensayo -17
Tulsa { N.º 2.....	57	0,05	0,028	Traza	...	121	0,12	245	279	374	380	24,9	-6
{ N.º 3.....	...	0,1	0,16 <sup>(1)</sup>	...	...	88	0,26 <sup>(1)</sup>	...	...	326	...	20-24	-9 -17
Diesel especial { N.º 1.....	...	0,06	0,02 <sup>(1)</sup>	...	...	63	0,6 <sup>(1)</sup>	...	216 <sup>(1)</sup>	...	316 <sup>(1)</sup>	26-40	-17 -19
Filadelfia { N.º 2.....	...	0,06	0,04 <sup>(1)</sup>	...	...	64	0,6 <sup>(1)</sup>	...	...	357	...	27-30	-17 -19
{ N.º 1.....	...	0,06	0,04 <sup>(1)</sup>	...	...	62	0,6 <sup>(1)</sup>	...	216 <sup>(1)</sup>	316 <sup>(1)</sup>	316 <sup>(1)</sup>	27-30	-17 -19
{ N.º 2.....	...	0,06	0,04 <sup>(1)</sup>	...	...	60	0,6 <sup>(1)</sup>	...	216 <sup>(1)</sup>	316 <sup>(1)</sup>	316 <sup>(1)</sup>	27-30	-17 -19

(1) Mínimo.  
(2) Máximo.

extraer tales materiales del combustible o, al menos, disminuir los efectos nocivos de los mismos al utilizar el combustible.

Los combustibles fósiles gaseosos, también son una mezcla de diversos hidrocarburos. Tienen numerosas ventajas como: presentar una combustión casi completa y de gran limpieza (no contienen ni cenizas ni residuos; se mezclan fácilmente con el oxígeno y como consecuencia, se necesita poco exceso de aire para acercarse a la completa combustión como ya se explicó. Los productos de su combustión no poseen componentes de azufre, por lo que no causan efectos nocivos en el ambiente). Existen enormes diferencias entre el gas natural (que se encuentra bajo el suelo) y los gases industriales (procedentes de diversos procesos como el de la refinación del petróleo o el de obtención de arrabio en un alto horno) o los manufacturados (la mayoría a partir del carbón), como se muestra en el cuadro 6.4.

Cuadro 6.4. Composición de varios gases combustibles(1)

Elementos constituyentes	Porcentajes en volumen									
	Gas natural	Gas de carbón rectificado	Gas de horno de coque	Gas de gas	Gas de aceite	Gas de agua carburada	Gas de gasólina obtenida con			Gas de alto horno
							Antrecia	Carbón bituminoso	Coque	
Hidrógeno.....	3,0	48,0	60,0	49,0	32,0	60,0	20,0	10,0	10,0	1,0
Metano.....	97,0	40,0	38,6	5,0	48,0	28,0	...	3,0	...	...
Materias luminosas.....	3,0	8,0	4,4	...	16,8	8,6	...	0,8	...	...
Oxido de carbono.....	...	8,0	8,0	54,0	...	10,0	25,0	23,0	20,0	27,8
Anhidrido carbónico.....	...	0,8	0,8	6,0	...	3,0	8,0	8,0	4,8	11,8
Nitrógeno.....	2,0	2,0	3,0	8,8	3,0	4,0	49,8	68,0	86,0	60,0
Oxígeno.....	...	0,8	0,8	0,8	1,4	0,8	0,8	0,8	0,8	...
Total.....	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Kcal por metro cúbico(*).....	8900	5874	4366	2625	7629	8117	1281	1281	1096	809
Relación de aire combustible en vo- lumen.....	8,72	8,0	8,6	3,35	8,07	8,25	1,12	1,2	0,88	0,72

(1) Estos análisis son típicos, toda vez que la composición de los gases es variable.  
 (2) Condiciones standard, 16° C y 1,033 kg por cm<sup>2</sup> (presión absoluta).

## 7. Mecánica de fluidos aplicada a la turbomaquinaria térmica

La turbina de gas involucra numerosos problemas de flujo de fluidos incluyendo cálculos de los ductos de entrada, flujos entre pasajes de los álabes, flujos en la cámara de combustión, etc.

La naturaleza del flujo a través de ductos y pasajes tridimensionales es complejo, por lo que su predicción de manera muy exacta es sumamente difícil. Cuando se requieren sólo algunas aproximaciones, para establecer relaciones funcionales, y proporcionar al diseñador un punto de juicio; es posible realizar análisis del tipo unidimensional y bidimensional. Estos últimos análisis, además, se simplifican para que puedan recibir un tratamiento teórico.

A continuación se resumen brevemente las generalidades y principios básicos teóricos de la mecánica de fluidos, que explican el comportamiento de la turbina de gas, considerando un flujo unidimensional.

### 7.1. Conceptos Básicos

Todo escurrimiento de un fluido está sujeto a las siguientes leyes y condiciones:

1) Las leyes de Newton del movimiento, las cuales deben valer para

toda partícula en todo instante.

- 2) La ecuación de continuidad, es decir, la ley de la conservación de la masa.
- 3) La primera y segunda leyes de la termodinámica.
- 4) Las condiciones de frontera del problema, las cuales consisten, esencialmente, en declaraciones analíticas de que un fluido tiene velocidad cero respecto a una frontera en la frontera misma o de que un fluido sin fricción no puede penetrar en una frontera.

Existen otras relaciones y ecuaciones importantes, como la ecuación de estado de una sustancia o la ley de Newton de la viscosidad.

Para establecer las ecuaciones que más tarde se aplicarán en el estudio de la turbomaquinaria, es preciso definir el volumen de control.

El volumen de control se refiere a una región de interés en el espacio a través de cuyas fronteras entra y sale continuamente un fluido. La frontera del volumen de control se llama superficie de control. Este concepto se emplea en la deducción de las ecuaciones de continuidad, de la cantidad de movimiento y de la energía.

7.1.1. Ecuación de continuidad para un volumen de control

La ecuación de continuidad es consecuencia del principio de conservación de la masa, el cual establece que la masa dentro de un sistema permanece constante con el tiempo (haciendo a un lado los efectos relativistas). Expresado matemáticamente,

$$\frac{dm}{dt} = 0$$

La ecuación de continuidad para un volumen de control establece que la rapidez de crecimiento de la masa dentro de un volumen de control es exactamente igual al flujo neto (entradas menos salidas) de masa hacia el mismo volumen de control. Matemáticamente,

$$\frac{d}{dt} \int_{vc} \rho dV + \int_{sc} \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad \dots (7.1)$$

donde:  $\rho$ , densidad del fluido

$dV$ , elemento de volumen

$\mathbf{v}$  vector velocidad

$d\mathbf{A}$ , vector que representa un elemento de la superficie de control a través de la cual el fluido escurre hacia afuera (tiene dirección perpendicular al elemento de área y es positivo si está dirigido hacia afuera del volumen de control).

7.1.2. Ecuación de la energía para un volumen de control

La ecuación de la energía es la expresión matemática de la ley de la conservación de la energía.

La primera ley de la termodinámica para un sistema, establece que el calor  $Q$  agregado a un sistema menos el trabajo  $W$  desarrollado por el sistema, depende sólo de los estados inicial y final del sistema. Dado que esta diferencia entre el calor y el trabajo es independiente de la evolución entre los estados del sistema, debe constituir ella misma una propiedad. Esta es llamada "energía del sistema" y se simboliza por  $E$ . Representa toda la energía contenida en el sistema en el estado dado. Por tanto, la primera ley se puede expresar como:

$$Q - W = E_2 - E_1 \quad \dots (7.2)$$

La rapidez de crecimiento de  $E$  dentro de un sistema es exactamente igual a la rapidez de crecimiento de tal parámetro dentro del volumen de control, más el flujo neto de  $E$  a través de la frontera del volumen de control. Esto puede expresarse matemáticamente como :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_C} \rho e \, dV + \int_{S_C} \rho e v \cdot dA \quad \dots (7.3)$$

donde  $e$  es la energía total por unidad de masa.

Utilizando la ecuación (7.2), se tiene:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{Vc} \rho e dV + \int_{Sc} \rho e v \cdot d\vec{A} \quad \dots (7.4)$$

El trabajo desarrollado por el sistema sobre sus alrededores se puede descomponer en dos partes:

- 1) El trabajo  $W_{pr}$  efectuado por las fuerzas de presión al actuar sobre fronteras móviles, y
- 2) el trabajo  $W_g$  realizado por las fuerzas cortantes como el par que se ejerce en una flecha.

El trabajo desarrollado por las fuerzas de presión en un tiempo  $dt$  se puede expresar como,

$$dW_{pr} = dt \int P v \cdot d\vec{A} \quad \dots (7.5)$$

donde  $P$ , presión.

De esta manera, la ecuación (7.4), llega a ser,

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW_g}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{Vc} \rho e dV + \int_{Sc} \left( \frac{P}{\rho} + e \right) \rho v \cdot d\vec{A} \quad \dots (7.6)$$

En ausencia de efectos nucleares, eléctricos, magnéticos y de tensión superficial, la energía e de una sustancia pura es

la suma de las energías potencial, cinética e interna. La energía interna del sistema comprende la energía del movimiento caótico (térmico) de todas las micropartículas, la energía de la interacción de estas partículas, la energía intranuclear, etc. Esta energía interna por unidad de masa se representa por  $u$ , y depende de  $P, \rho, T$  (estado termodinámico del sistema). Se puede escribir,

$$e = gz + \frac{v^2}{2} + u \quad \dots (7.7)$$

7.1.3. Ecuación de la cantidad de movimiento (o momentum)  
para un volumen de control

La ecuación de momentum o cantidad de movimiento se establece a partir de la segunda ley de Newton para el movimiento.

Esta ecuación afirma que la fuerza resultante que actúa en un volumen de control es igual a la rapidez con que aumenta la cantidad de movimiento dentro del volumen de control, más el flujo neto de cantidad de movimiento que sale del volumen de control. Matemáticamente,

$$\sum F = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_C \rho v dv + \int_{sc} \rho v v \cdot dA \quad \dots (7.8)$$

Dado que la fuerza es una cantidad vectorial, la ecuación del momentum es una ecuación vectorial.

Cuando un fluido se mueve a través o sobre un cuerpo sólido, un cierto número de fuerzas son ejercidas sobre él y la ecuación de la cantidad de movimiento describe un balance entre estas fuerzas y la variación de la cantidad del movimiento del fluido.

La fuerza total ejercida por el fluido contra las fronteras del cuerpo sólido tiende a mover el cuerpo. Esta fuerza, llamada empuje, es la suma algebraica de la fuerza de presión sobre las paredes laterales, las fuerzas de presión y las de arrastre.

La ecuación vectorial descrita, puede descomponerse en 3 ecuaciones escalares, correspondiendo a cada una de 3 direcciones mutuamente perpendiculares; por ejemplo, en la dirección X se tiene,

$$\sum F_x = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho v_x dv + \int_{SC} \rho v_x v \cdot dA \quad \dots (7.9)$$

Para el sistema de unidades técnico generalmente empleado, es necesario introducir la constante  $g_c$ , con lo cual,

$$\sum F_x = \frac{1}{g_c} \left[ \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho v_x dv + \int_{SC} \rho v_x v \cdot dA \right] \quad \dots (7.10)$$

En el caso de un proceso en flujo estable (el que se encuen-

tra en una turbounidad), en el que hay sólo un escurrimiento con propiedades uniformes dentro de la superficie de control y también un sólo escurrimiento con propiedades uniformes fuera de la superficie de control, se tiene que las integrales de volumen son iguales a cero; esto es,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_C} v_x \rho dv = 0$$

Esto permite escribir,

$$\int_{S_C} v_x \rho v \cdot dA = \dot{m}_e (V_e)_x - \dot{m}_i (V_i)_x \quad \dots (7.11)$$

donde  $\dot{m}$ , flujo másico

El subíndice e se refiere a condiciones de salida, el subíndice i lo hace a condiciones de entrada.

Por lo tanto, para tal proceso, la ecuación de la cantidad de movimiento para un volumen de control se reduce, en dirección X, a

$$\dot{F}_x = \frac{1}{g_c} \left[ \dot{m}_e (V_e)_x - \dot{m}_i (V_i)_x \right]$$

Si con las consideraciones anteriores existe sólo un escurrimiento dentro y fuera del volumen de control en dirección X, se tiene,

$$\dot{F}_x = \frac{\dot{m}}{g_c} \left[ (V_e)_x - (V_i)_x \right]$$

## 7.2. Turbomaquinaria

El fluido que pasa a través de una turbounidad, sea ésta un expansor (turbina) o un compresor, experimenta un proceso a flujo estable<sup>1/</sup> durante el cual tiene lugar transferencia de trabajo. El proceso es casi completamente adiabático debido a que la turbounidad es normalmente enfríaada.

### 7.2.1. Flujo a través de los pasajes de los álabes de una turbina

Una "etapa" o "paso" de una turbina, consiste en un anillo de toberas (o ductos que actúan como toberas), o de álabes fijos, y en un anillo de álabes móviles.

Un chorro de fluido a elevada velocidad se descarga, desde las toberas, sobre los álabes móviles; esto último causa que la velocidad absoluta del fluido sea desviada en dirección y disminuida en magnitud. Esto resulta en la aplicación de una fuerza sobre los álabes móviles y en transferencia de trabajo de acuerdo con la ecuación de energía.

La fuerza neta del fluido actuante sobre los álabes móviles

---

<sup>1/</sup> Si en cualquier punto de la corriente de un fluido ninguna de las propiedades locales del fluido cambian con el tiempo, entonces el flujo es estable o uniforme. Hay muchos casos en que el flujo es inestable, pero puede tratarse como si fuera flujo estable, utilizando propiedades promedio o cambiando el marco de referencia.

es la suma de dos efectos separados:

- a) Una fuerza producida por un incremento en la magnitud de la velocidad del fluido relativa a los álabes móviles. Una turbina que desarrolla su energía motriz de este modo es convencionalmente conocida como turbina de "reacción".
- b) Una fuerza resultante de un cambio en la dirección del movimiento del chorro del fluido. Cuando la fuerza que actúa sobre los álabes móviles es debida exclusivamente a este efecto, la turbina es llamada una máquina de "impulso" o de "acción".

En un paso de impulso, la caída total de presión tiene lugar en las toberas estacionarias (la presión, energía potencial o entalpía, se convierte en velocidad, energía cinética); y permanece después constante mientras el fluido pasa por los álabes móviles; ocurriendo, mientras tanto, una disminución en la energía cinética del fluido y también un aumento en entropía, debido a las irreversibilidades asociadas con el flujo del fluido. Véase figura 7.1(a)

En un paso de reacción pura, el descenso total de presión ocurre mientras el fluido pasa por los álabes móviles; así que éstas actúan como toberas, y los pasos por entre ellos deberán tener sus contornos adecuados para trabajar como tales (convergentes si la presión de salida es mayor que la presión crítica y convergentes-divergentes si la presión de salida es menor que la presión crítica) La única función de los álabes estacionarios en un paso de reacción

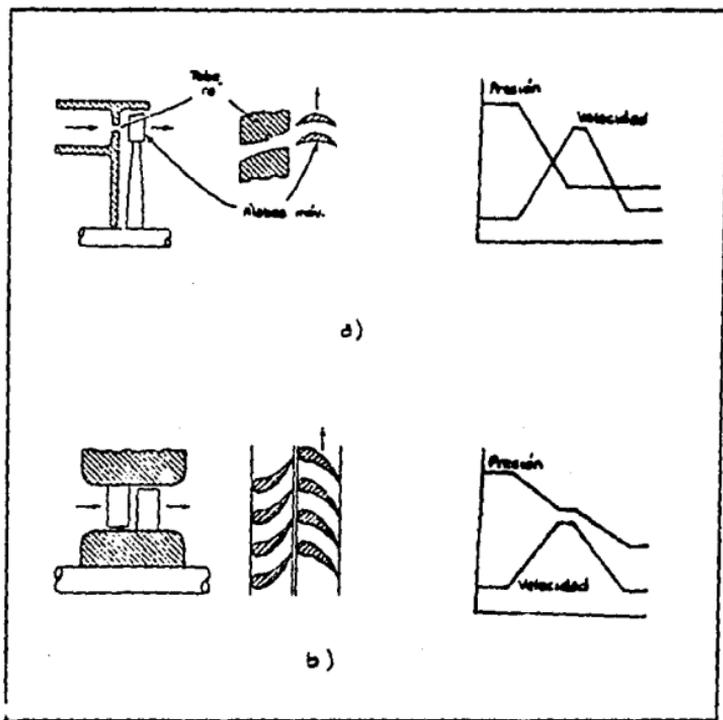


Figura 7.1. Distribución esquemática para :  
a) Paso de impulso  
b) Paso de reacción

pura, es dirigir el fluido hacia los álabes móviles, y hacerlo entrar en ellas con la debida velocidad y bajo el ángulo conveniente. Véase figura 7.1(b).

En la práctica no existe una turbina de reacción pura. Sin embargo, el término "turbina de reacción" es usado para denotar una máquina en la que los álabes móviles experimentan una combinación de fuerzas de impulso y de reacción.

Estas presentan descensos de presión y de entalpía tanto en los álabes fijos como en los móviles; el grado de reacción que les corresponde, se estima (como se verá en detalle más adelante) según la baja de entalpía que ocurre en los álabes móviles; así en un paso de reacción al 50%, que es muy frecuentemente empleado, la mitad del descenso en entalpía ocurre en los álabes móviles, y la otra mitad en los álabes fijos.

Resulta muy interesante el hacer algunas comparaciones entre los álabes de impulso y los de reacción. Como hay una caída de presión, tanto al pasar por los álabes fijos como en los móviles en un paso de reacción, habrá cierta tendencia a fugas en el extremo del álabes, por lo que deberá mantenerse un ajuste bastante preciso entre los extremos de los álabes. Además, el descenso de presión a través del álabes móvil en un paso de reacción, da lugar a fuerzas axiales que deberán ser contrarrestadas para evitar movimientos axiales en las turbinas de reacción.

En un paso de impulso, por su parte, es posible usar sólo parte de la periferia para la admisión del fluido; esto se denomina admisión parcial. De hecho, en las turbinas que utilizan un paso de impulso como primer paso, la potencia puede controlarse abriendo o cerrando las toberas. La ventaja principal de los pasos de reacción, consiste en que se trabaja con menores velocidades, y así es posible lograr mayor rendimiento.

El flujo adiabático de un fluido a través de los álabes de una turbina es gobernado por las ecuaciones de continuidad, de energía y de momentum o cantidad de movimiento.

Esta última es especialmente útil en la determinación de la fuerza neta que actúa sobre los álabes móviles a partir del conocimiento del cambio registrado en la velocidad del fluido.

En el análisis del flujo entre los pasajes de una turbina, es necesario considerar tanto las velocidades absolutas como las relativas, entendiéndose por velocidad absoluta, la que vería un observador estacionario; y por velocidad relativa, la que vería otro observador fijo sobre los álabes en movimiento (esto es, moviéndose al igual que los álabes). Esta última velocidad se designa con el subíndice R en las figuras, mientras que la velocidad del álabe lo está por  $V_B$ .

Siempre debe recordarse que la velocidad es una cantidad

vectorial que tiene sentido y dirección, lo mismo que magnitud, por tanto, la determinación del cambio de velocidad del fluido debe ser hecho vectorialmente. Esto impone la construcción de diagramas vectoriales; es útil adoptar la convención que los vectores de la velocidad absoluta sólo pueden ser fijados a partir de un origen seleccionado.

La figura 7.2, muestra diagramas vectoriales típicos correspondientes a una turbina y a un compresor. En cada caso, el primer esquema muestra los vectores velocidad en relación con los álabes, y el segundo esquema muestra cómo han sido dibujados los diagramas vectoriales. En estos diagramas,  $V_1$  representa la velocidad del fluido entrando al paso de los álabes;  $\alpha$  indica el ángulo bajo el cual entra;  $V_{1r}$  representa la velocidad relativa del fluido entrando al paso de álabes y  $\beta$  el ángulo bajo el cual entra; de modo semejante,  $V_2$  y  $V_{2R}$ , respectivamente, representan las velocidades absoluta y relativa del fluido al salir; y los ángulos son también, respectivamente,  $\delta$  y  $\delta'$ .

Al analizar el flujo por un paso de álabes, es conveniente considerar la superficie de control, como lo indica la figura 7.3 la que muestra los puntos de vista de un observador estacionario y de otro en movimiento.

El diseño de turbomaquinaria, desde el punto de vista de la mecánica de fluidos, tiene por objetivo acomodar y dar la forma

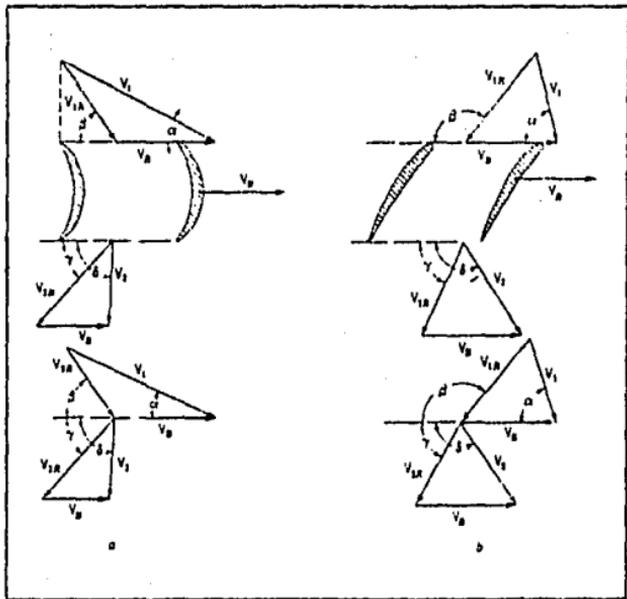


Figura 7.2. Diagramas vectoriales de las velocidades :  
a) para una turbina,  
b) para un cc. presor

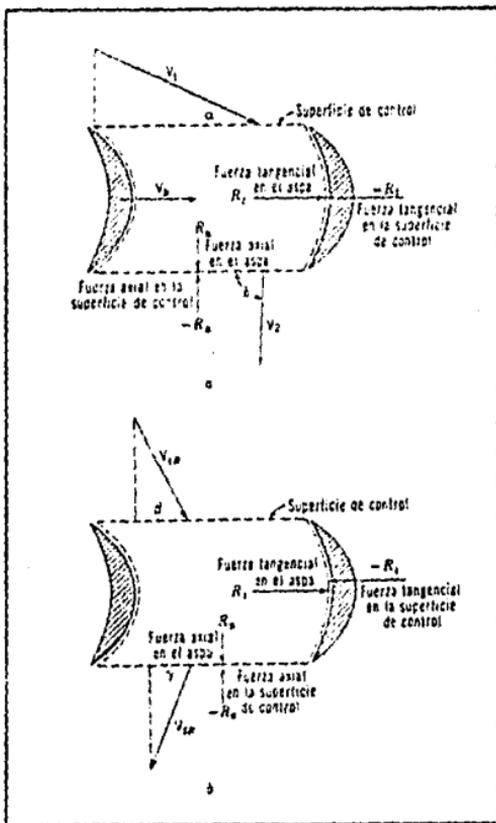


Figura 7.3. Análisis de las fuerzas que actúan sobre un álabe de turbina:  
a) para un observador estacionario,  
b) para un observador moviéndose con el álabe

apropiada a los álabes y, con ello, a los conductos entre ellos para que la máquina resultante cumpla eficazmente con su propósito. El diseño particular depende del uso que se vaya a dar a la máquina, del trabajo desarrollado por unidad de masa del fluido, de la densidad del fluido y de la eficiencia.

### 7.2.2 Tipos de turbinas térmicas

La turbomaquinaria térmica, lo mismo que la hidráulica, puede ser dividida en dos categorías de acuerdo a la dirección general del flujo (punto de vista funcional dinámico); estas categorías son:

- a) en maquinaria de flujo axial;
- b) en maquinaria de flujo radial

En la maquinaria de flujo axial, el flujo procede a lo largo de superficies cilíndricas coaxiales con la flecha; esto es, la velocidad del fluido es prácticamente paralela al eje de rotación.

En la maquinaria de flujo radial, el flujo se mueve en planos a ángulos rectos al eje de rotación.

La mayoría de las turbomáquinas para fluidos compresibles son del tipo de flujo axial.

A continuación se presenta un breve comentario y análisis de los distintos tipos de turbomaquinaria, y los más utilizados.

#### 7.2.2.1. Maquinaria de flujo axial

##### a) La turbina simple de impulso o de Laval

En su forma más elemental, la turbina de impulso de flujo axial consta de un anillo de álabes montados alrededor de la periferia de una rueda.

Chorros de fluido a elevada velocidad provenientes de las toberas son inclinados a un ángulo agudo al plano de la rueda y así inciden en los álabes. Obviamente la velocidad lineal de los álabes se incrementará uniformemente desde la raíz hasta la punta; sin embargo, es común basar los cálculos sobre la velocidad principal del álabes que ocurre en la sección del álabes ubicada a la mitad de la longitud.

El triángulo de velocidades para las condiciones de entrada es construido al trazar vectores, desde algún origen convenido para representar las velocidades absolutas de los álabes y del fluido. Estos vectores estarán inclinados, el uno respecto al otro, un ángulo  $\alpha$ , llamado "de tobera". La velocidad del fluido relativa a los álabes es obtenida al completar el triángulo de vectores y, si los álabes están correctamente diseñados para esas condiciones, la velo-

idad relativa será tangencial a la superficie interna del álabe<sup>1/</sup>; de este modo no habrá pérdidas por choque a la entrada.

Si es permisible el despreciar la fricción entre el fluido y la superficie del álabe, la velocidad relativa a la salida es igual en magnitud a la velocidad relativa a la entrada y puede ser entonces establecido vectorialmente, considerando el ángulo de salida del álabe. Esto hace posible que se complete el triángulo de velocidades a la salida. Véase figura 7.4(a).

Suponiendo que los pasajes entre los álabes no obstaculicen la trayectoria del fluido, la fricción entre éste y el álabe resulta en una disminución de la velocidad relativa del fluido. En este caso, la razón de las velocidades relativas a la salida y a la entrada es llamada el "coeficiente de velocidad" para los álabes.

Los componentes axial y tangencial de la velocidad absoluta del fluido a la entrada y a la salida de los álabes móviles pueden ser graduados a partir de los triángulos de velocidades. Es común referirse al último componente como la velocidad "de giro" del fluido.

---

1/ Cuando la velocidad relativa no es tangente al álabe en su entrada, se separa el flujo, se forman corrientes secundarias, el flujo se torna turbulento. Esto ocasiona que las pérdidas aumenten, tienden a hacerlo en forma rápida (casi parabólica) con el ángulo de la tangente y afectan radicalmente la eficiencia de la máquina.

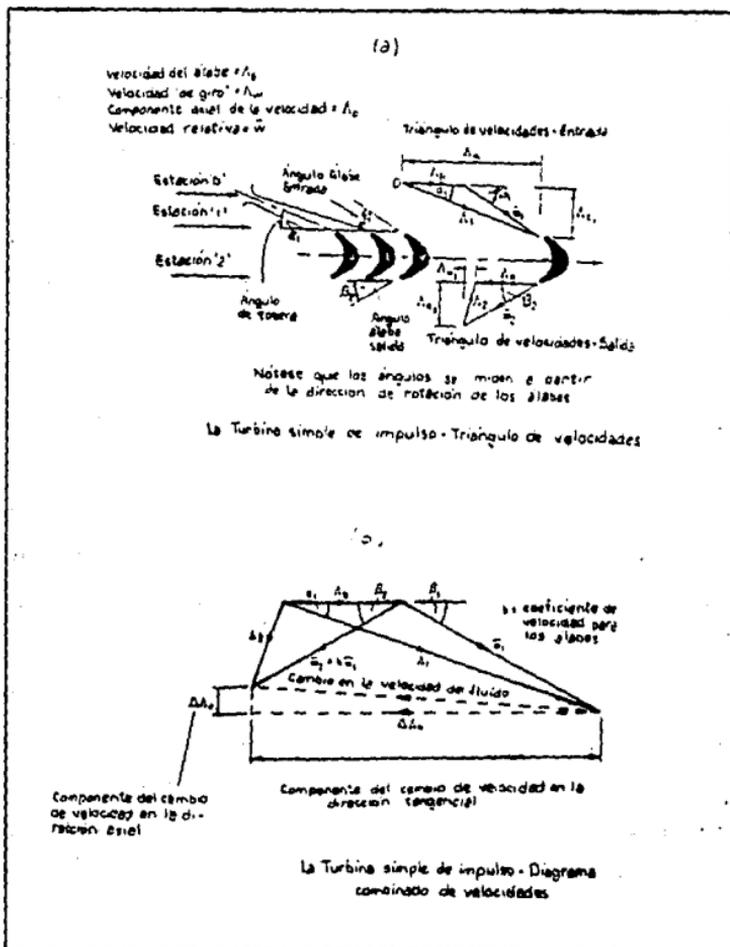


Figura 7.4.

Los diagramas vectoriales de la figura 7.4(b), muestran que los triángulos de velocidades pueden ser sobrepuestos al dibujarlos a partir del vector base común  $V_g$ . Este procedimiento no sólo tiene un efecto de economía en tiempo y esfuerzo, sino que, además, el cambio en la velocidad del fluido puede ser obtenido directamente del diagrama de velocidad combinado. En general, el cambio de velocidad del fluido puede ser dividido en sus componentes en las direcciones axial y tangencial. La última componente, esto es, el cambio en la velocidad de giro  $\Delta \omega$ , es, con mucho, la mayor de las dos y es causada por la fuerza ejercida por el álabe sobre el fluido en la dirección tangencial. Por la tercera ley del movimiento de Newton, ésta debe ser igual en magnitud, aunque opuesta en dirección, al empuje útil ejercido por el fluido sobre el álabe. La componente axial, en cambio, de la variación de velocidad, ocasiona un empuje lateral sobre la rueda de la turbina.

Se puede aplicar ahora la ecuación de cantidad de movimiento o momentum para establecer la fuerza ejercida sobre los álabes en la dirección de su movimiento.

De acuerdo con esto, se tiene,

$$F = \frac{m \Delta V_u}{3}$$

... (7.12)

Es interesante destacar que debe considerarse que esta fuer-

za actúa al radio principal y constante de los álabes, y, entonces, la potencia obtenida está dada por,

$$W_u = \frac{\dot{m} \Delta \Lambda_w}{g} \cdot \Lambda_B \quad \dots (7.13)$$

Una medida de la efectividad de los álabes en la producción de trabajo útil en la flecha a partir de la energía presentada a ellos está dada por la razón:

eficiencia del álabe		Trabajo hecho por libra de fluido
ó	$\eta_B =$	_____
eficiencia de diagrama		Energía disponible por libra de fluido

Dado que la única energía disponible en los álabes de impulso está en la forma de energía cinética del chorro, se tiene,

$$\eta_B = \frac{W_u}{\Lambda_1^2 / 2g} = \frac{\Delta \Lambda_w \cdot \Lambda_B}{g} \cdot \frac{2g}{\Lambda_1^2} = \frac{2 \Delta \Lambda_w \Lambda_B}{\Lambda_1^2} \quad \dots (7.15)$$

A cualquier particular velocidad de entrada del chorro de fluido, la eficiencia de los álabes varía conforme la velocidad del álabe es variada.

La eficiencia del álabe es, desde luego, cero cuando los álabes están en reposo; conforme la velocidad del álabe es incrementada, su eficiencia pasa hasta un valor máximo y después regresa a cero cuando la velocidad del álabe se acerca a la velocidad del

chorro.

Claramente, es importante conocer la razón de la velocidad del álabe a la del fluido a la cual se alcanza la máxima eficiencia del álabe. Esta puede ser calculada al proyectar una expresión para  $\eta_B$  en términos de la razón velocidad del álabe/velocidad del fluido, derivando con respecto a esta razón e igualando el resultado a cero para establecer la condición para la máxima eficiencia del álabe.

Tomando como referencia la figura 7.4(b),

$$\begin{aligned}\Delta V_w &= \bar{w}_1 \cos \beta_1 + k \bar{w}_1 \cos \beta_2 \\ &= \bar{w}_1 \cos \beta_1 \left( 1 + k \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} \right)\end{aligned}$$

Como los elementos contenidos dentro de los paréntesis son constantes, pueden ser denotados por el símbolo  $k$  y entonces se tendrá,

$$\begin{aligned}\Delta V_w &= k \bar{w}_1 \cos \beta_1 \\ &= k (\bar{V}_1 \cos \alpha_1 - \bar{V}_2)\end{aligned}$$

Entonces, la eficiencia del álabe puede ser escrita como

$$\eta_B = \frac{2k \bar{V}_1}{\bar{V}_1} (\bar{V}_1 \cos \alpha_1 - \bar{V}_2)$$

Si se denomina  $\phi = \Lambda_B / \Lambda_1$

Entonces,

$$\eta_B = 2k(\phi \cos \alpha_1 - \phi^2) \quad \dots (7.16)$$

Derivando con respecto a  $\phi$  e igualando a cero, se tendrá,

$$\cos \alpha_1 = 2\phi$$

Por lo tanto, la máxima eficiencia del álabe ocurre cuando

$$\phi = \frac{\cos \alpha_1}{2} \quad \dots (7.17)$$

La magnitud de la máxima eficiencia del álabe puede ser encontrada al sustituir la razón óptima en (7.16)

$$\eta_{B_{max}} = \frac{1}{2} k \cos^2 \alpha_1 \quad \dots (7.18)$$

El flujo a través de la etapa de impulso debe, además, cumplir con los requerimientos de la ecuación de energía de flujo estable como se muestra a continuación:

Debe entenderse que la naturaleza del fluido de trabajo no afecta los principios a ser descritos, pero como es conveniente el representar la expansión sobre un diagrama entalpía-entropía,

se asumirá que el fluido de trabajo es vapor.

La ecuación de energía para flujo a través de álabes es,

$$q - \omega_v = h_2 - h_1 + \frac{\Lambda_2^2 - \Lambda_1^2}{2g}$$

para flujo adiabático,

$$\omega_v = h_1 - h_2 + \frac{\Lambda_1^2 - \Lambda_2^2}{2g} \quad \dots (7.19)$$

Alternativamente, como no se transfiere trabajo relativamente a los álabes móviles,

$$0 = h_1 - h_2 + \frac{\bar{\omega}_1^2 - \bar{\omega}_2^2}{2g} \quad \dots (7.20)$$

Sustituyendo (7.20) en (7.19).

$$\omega_v = \frac{1}{2g} (\bar{\omega}_2^2 - \bar{\omega}_1^2 + \Lambda_1^2 - \Lambda_2^2)$$

Si la fricción está ausente, entonces no habrá ningún cambio en la velocidad relativa conforme el vapor pase sobre los álabes, y el trabajo resultante se reduce a la diferencia entre las energías cinéticas del vapor en la entrada y en la salida.

Una expresión alternativa para calcular la eficiencia de los álabes y de forma más general, puede ser,

$$\eta_a = \frac{\bar{\omega}_2^2 - \bar{\omega}_1^2 + \Lambda_1^2 - \Lambda_2^2}{\Lambda_1^2} \quad \dots (7.21)$$

Al aplicar la ecuación de energía a la etapa completa, esto es, a la combinación de anillo de toberas \_anillo de álabes, se tiene

$$\omega_u = h_0 - h_2 + \frac{\Lambda_0^2 - \Lambda_2^2}{2g}$$

La velocidad a la entrada de la etapa es, comparativamente muy pequeña, así que,

$$\omega_1 = h_2 - h_2 - \frac{\Lambda_2^2}{2g}$$

Nótese que el trabajo útil resultante es menor que la caída de entalpía actual en la etapa en la medida de la energía cinética del vapor a la salida.

Esta energía cinética es frecuentemente considerada como pérdida. Evidentemente, el máximo trabajo teórico será realizado cuando esta pérdida se reduzca a cero, y si se alcanza la caída de entalpía más alta posible por medio de una expansión isoentrópica

El trabajo resultante máximo de la etapa, en teoría, puede

ser igualado a la caída de entalpía isentrópica,  $\Delta h$  del vapor.  
Véase figura 7.5.

Si la eficiencia de la etapa es definida como la razón de la realmente verificada y la máxima transferencia de trabajo posible

$$\eta_s = \frac{w_w}{\Delta h} \quad \dots (7.22)$$

es razonable esperar que la eficiencia de la etapa será una función de las eficiencias de la tobera y de los álabes móviles.

Si se desprecia la velocidad de entrada a la tobera, entonces la eficiencia de la tobera puede ser escrita como

$$\eta_N = \frac{V_1^2 / 2g}{\Delta h}$$

La eficiencia de la etapa también puede encontrarse por el producto de las eficiencias de la tobera y álabes, es decir,

$$\eta_s = \eta_N \eta_e \quad \dots (7.23)$$

$$\frac{w_w}{\Delta h} = \frac{V_1^2 / 2g}{\Delta h} \cdot \frac{w_w}{V_1^2 / 2g}$$

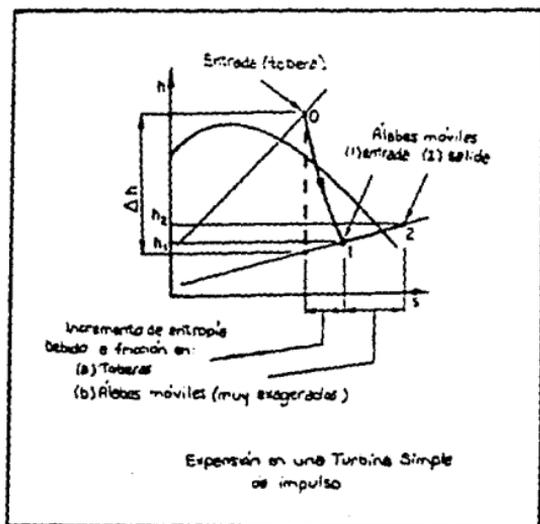


Figura 7.5.

**b) La turbina de impulso de presión combinada o Rateau**

En la turbina simple de impulso, la presión del fluido de trabajo es disminuida en un solo anillo de toberas. Se tienen entonces, enormes velocidades del chorro de fluido y considerables pérdidas por fricción; además, se tienen las correspondientes elevadas velocidades rotacionales de los álabes que provocan una intensa carga centrífuga. Todo ello deriva en bajas eficiencias de los álabes y elevadas pérdidas.

Un método para superar estas dificultades es denominada "combinación de presión". Este fue implementado por Rateau; consiste en el arreglo de varias turbinas simples de impulso en serie, esto es, las toberas de una etapa recogen el fluido descargado del anillo precedente de álabes móviles. La caída total de entalpía está distribuida entre las filas de toberas, de modo que la caída de entalpía de cada fila es aproximadamente la misma. De esta manera es posible, además, alcanzar una disminución de la máxima velocidad del fluido. Véase figura 7.6

Los cálculos basados en las ecuaciones de momentum y energía son fundamentalmente similares a las realizadas en la máquina simple de impulso. Sólo es interesante una revisión del proceso de expansión representado en coordenadas entalpía-entropía.

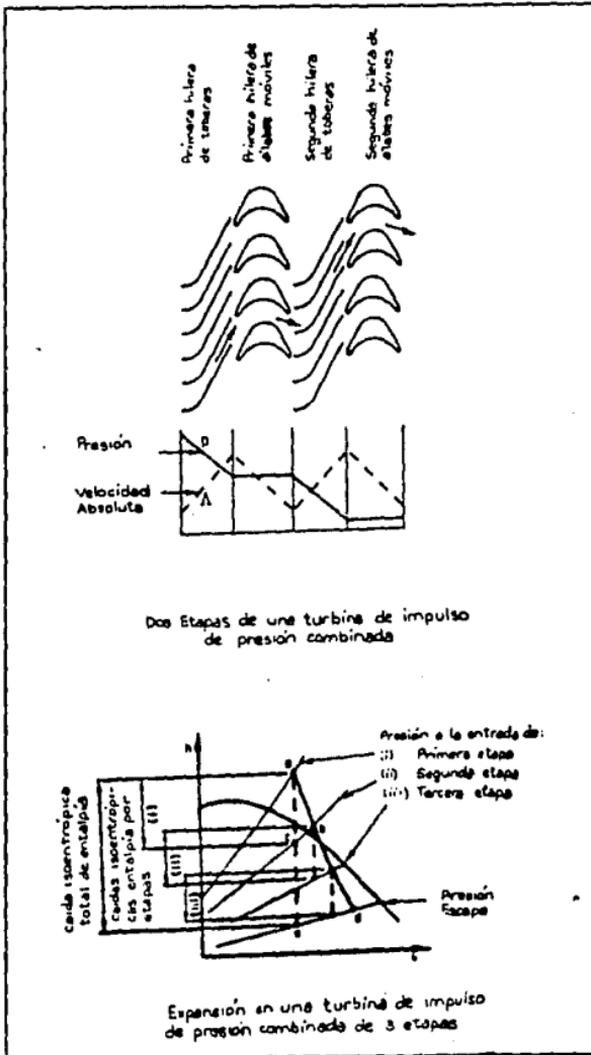


Figura 7.6.

La eficiencia interna de la turbina como un todo, es la razón del trabajo desarrollado en todos los anillos de álabes a la caída de entalpía isoentrópica total.

$$\eta_{i_t} = \frac{W_u}{h_a - h_e}$$

Con la combinación de presión, el cambio total en la energía cinética del fluido puede ser despreciada, y se puede escribir que

$$W_u = h_a - h_g$$

$$\eta_{i_t} = \frac{h_a - h_g}{h_a - h_e}$$

... (7.24)

En correspondencia, la eficiencia de cada una de las etapas puede quedar

$$\eta_{i_s} = \frac{h_a - h_b}{h_a - h_c}$$

... (7.25)

Un examen del diagrama  $h_s$  de la figura 7.6 mostrará que la suma de las caídas de entalpía isoentrópicas en cada una de las etapas  $\sum (h_a - h_c)$ , debe ser mayor que la caída de entalpía isoentrópica total. Esto resulta de la cada vez más amplia separación de las líneas de presión constante a mayores valores de entropía.

La cantidad  $\xi(h_a - h_c)$  es llamada la "caída de entalpía acumulada" para la turbina, y la razón  $\frac{\xi(h_a - h_c)}{h_a - h_0}$ , la cual debe ser numérica-

mente mayor que la unidad, es conocida como "factor de recalentamiento R".

Suponiendo que la eficiencia de cada una de las etapas de presión combinada es la misma, se puede escribir,

$$\eta_T = \frac{\eta_s \xi(h_a - h_c)}{h_a - h_0} = \eta_s R \quad \dots (7.26)$$

A pesar de la aparente similitud entre las definiciones de la eficiencia de la turbina y de la etapa, éstas no pueden ser numéricamente iguales, dado que  $R > 1$

### c) La turbina de impulso de velocidad combinada o Curtis

Otra solución a los problemas que presenta una máquina de impulso simple, los cuales ya se han comentado, es la ofrecida por la combinación de velocidad.

En ésta, como en la máquina de impulso simple, la caída total de presión del fluido tiene lugar en una serie inicial de toberas, pero la velocidad rotacional es deliberadamente limitada.

Las consecuentes elevadas pérdidas son parcialmente recuperadas al dirigir el fluido de escape de un primer anillo de álabes móviles sobre un segundo anillo de álabes móviles. Se asegura, además, una aún mayor recuperación de energía cinética, si el fluido que abandona el segundo anillo de álabes móviles es dirigido sobre un tercer anillo, y así sucesivamente. Es importante notar que una vez que el fluido ha dejado la inicial hilera de toberas, no ocurre ninguna expansión posterior y el chorro es solamente desviado de una hilera de álabes móviles sobre la siguiente hilera por medio de álabes guía fijos. Véase la figura 7.7(a)

El empuje tangencial total ejercido sobre los álabes móviles, y por tanto el trabajo útil total desarrollado, puede ser encontrado a partir del conocimiento del cambio total de la velocidad "de giro" sufrido por el fluido en todos los anillos de álabes móviles. Esto lleva a la construcción de un diagrama de velocidad combinado para cada uno de los anillos de álabes móviles.  $\Delta C_u$  puede ser entonces encontrado y substituido en las ecuaciones (7.13) y (7.15) para obtener el trabajo de salida total y la eficiencia del álabes.

La construcción de los diagramas de velocidad se facilita al recordar que el fluido que se dirige sobre el segundo juego de álabes móviles (y subsiguientes hileras) a partir de álabes guía fijos, y que el ángulo de salida del álabes guía toma el lugar del

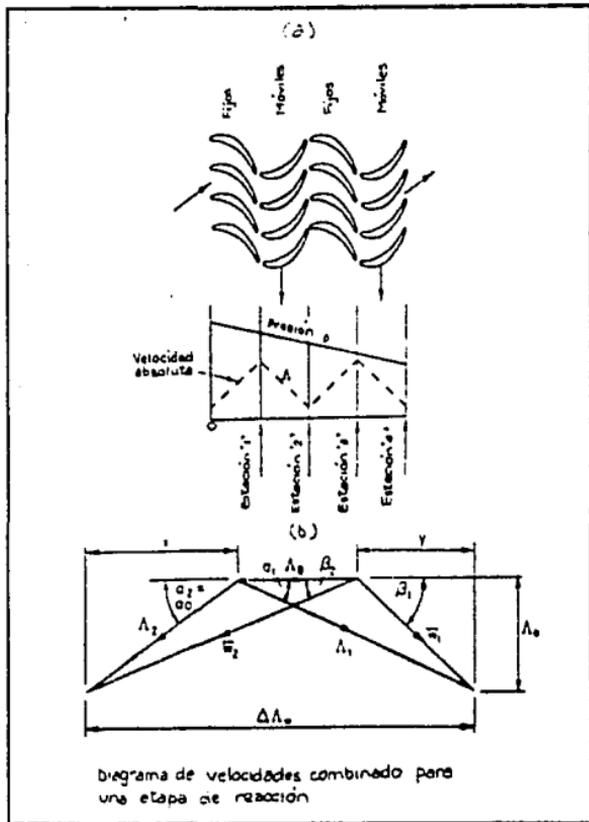


Figura 7.7.

ángulo de tobera. Véase la figura 7.7(b)

Si se considera la fricción, la caída en la velocidad absoluta del fluido al pasar por los álabes fijos, debe ser mostrada en los diagramas vectoriales.

El análisis trigonométrico de los diagramas vectoriales, similar al realizado en la turbina simple, permitirá encontrar la razón óptima velocidad del álabe/velocidad del fluido, de una turbina de velocidad combinada con N etapas.

Considerable trabajo matemático se puede evitar al asumir el flujo sin fricción y disposición simétrica de los álabes. El resultado de este análisis revela que la máxima eficiencia del álabe ocurre cuando

$$\beta = \frac{1}{2} \cos \alpha, \quad \dots (7.27)$$

La magnitud de la máxima eficiencia del álabe no es afectada por el número de etapas de álabes colocadas simétricamente a un valor de  $\cos^2 \alpha$ .

Sin embargo, la introducción de anillos de álabes adicionales produce pérdidas friccionales incrementadas y la máxima eficiencia del álabe sufre alteraciones. La figura 7.8 resume los efectos

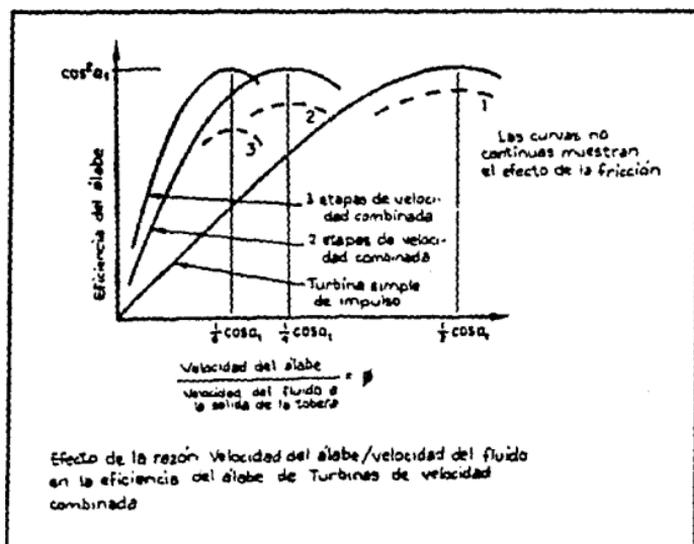


Figura 7.8.

de la razón velocidad del álabe/velocidad del fluido sobre la eficiencia del álabe para varios números de etapas de velocidad combinada.

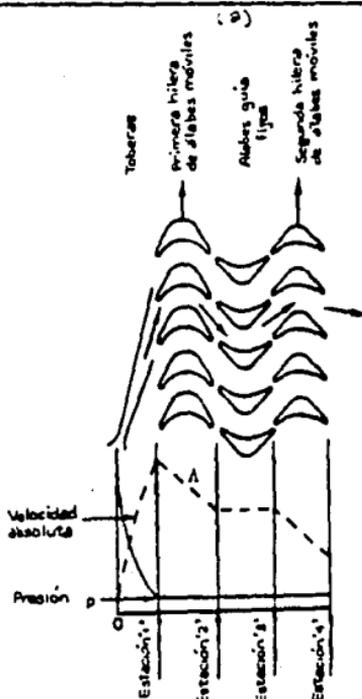
d) La turbina de impulso\_reacción, ó turbina de Parsons

Los álabes fijos en una turbina de impulso\_reacción están formados por anillos de álabes de muy similar apariencia a la de los álabes móviles.

Hay usualmente un elevado número de etapas en una turbina de "reacción" y, en consecuencia, es más conveniente fijar los álabes móviles en el tambor del rotor y no en series de ruedas. Los álabes fijos, por su parte, son empotrados a la carcasa de la turbina y las filas de los mismos se van "entretejiendo" entre los álabes móviles. Véase figura 7.9(a)

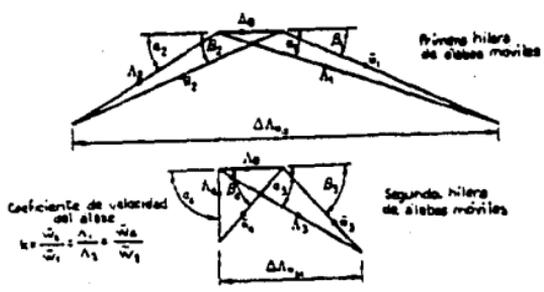
Como cada fila de álabes, sean fijos o móviles, expanden el fluido, entonces todos los álabes deben ser cuidadosamente sellados en sus puntas para mantener las pérdidas por fuga en un mínimo.

Para que pueda disponerse de suficiente área anular para el flujo, las longitudes de los álabes son incrementadas gradualmente conforme las caídas de presión y conforme el volumen específico



dos etapas de una turbina de impulso de velocidad combinada

(b)



Diagramas de velocidad para una turbina de impulso de velocidad combinada de 2 etapas

del fluido se incrementa en su paso a lo largo de la turbina.

Se puede alcanzar una considerable economía si todos los álabes en los anillos fijos son hechos con la misma sección transversal, y asimismo, es deseable el tener todos los álabes móviles de la misma forma. Esto puede ser hecho si existe uniformidad de flujo en las sucesivas etapas lo que significa, teniendo en mente que el fluido que deja una etapa entra en la siguiente, que las velocidades absolutas a la entrada y a la salida de cada etapa deben ser idénticas. Es también usual trabajar suponiendo que la velocidad axial es la misma a la entrada de los álabes fijos y móviles.

La figura 7.9(b) muestra la forma general del diagrama de velocidades combinado para una etapa de reacción de acuerdo a las condiciones descritas.

Hasta ahora, no se ha hecho ninguna división entre la caída de entalpía que ocurre en los álabes fijos y los móviles; mientras que en este caso es apropiado relacionar estos cambios de energía por el cociente:

$$\text{Grado de reacción (\%)} = \frac{\text{Caída de entalpía en los álabes móviles}}{\text{Caída de entalpía en la etapa de reacción}} \times 100 .$$

Ocurre una considerable ventaja práctica al tener un grado de reacción del 50%; esta afirmación se muestra a partir del estudio

de la geometría de la figura 7.9(b), unido a la aplicación de la ecuación de energía a los álabes.

Se tiene, para los álabes fijos,

$$h_0 - h_1 = \frac{\Lambda_1^2 - \Lambda_0^2}{2g} = \frac{\Lambda_1^2 - \Lambda_2^2}{2g}$$

y para los álabes móviles,

$$h_1 - h_2 = \frac{\bar{\omega}_2^2 - \bar{\omega}_1^2}{2g}$$

entonces, para un grado de reacción del 50%,

$$\Lambda_1^2 - \Lambda_2^2 = \bar{\omega}_2^2 - \bar{\omega}_1^2$$

Haciendo referencia a la figura 7.9(b),

$$(\Lambda_B + y)^2 - x^2 = (\Lambda_B + x)^2 - y^2$$

$$\frac{y}{\Lambda_B + x} = \frac{x}{\Lambda_B + y}$$

$$\frac{y + \Lambda_B + x}{\Lambda_B - x} = \frac{x + \Lambda_B + y}{\Lambda_B + y}$$

$$y = x$$

El diagrama de velocidad combinado es entonces simétrico y  $\alpha_1 = \beta_2$ , mientras que  $\alpha_2 = \alpha_0 = \beta_1$ .

Esto significa que todos los álabes en una turbina de reacción al 50%, tanto los fijos como los móviles, deben tener la misma forma en su sección transversal. Esto representa un gran beneficio económico y, de hecho, la mayoría de las turbinas de reacción son construidas de este modo.

Una expresión para la eficiencia de cada etapa de reacción por separado, puede encontrarse al imaginar una de tales etapas aislada por una frontera o límite del sistema (como ya se definió anteriormente). Idealmente, la entrada total de energía a la etapa será la suma de la energía cinética contenida desde la etapa precedente y la caída de entalpía isoentrópica  $h_0 - h_1$  en la propia etapa.

$$\text{Entrada ideal de energía total por etapa} = \frac{A_2^2}{2g} + h_0 - h_1$$

Destacando el caso de los álabes con un grado de reacción del 50%, este valor es,

$$\text{Entrada ideal de energía total por etapa} = \frac{A_2^2}{2g} - 2(h_0 - h_1)$$

Si se consideran efectos friccionales, entonces, por esta razón,  $h_0 - h_1$  será mayor que el actual incremento en energía ciné-

tica en los álabes fijos. Por simplicidad algebraica, estos efectos son comúnmente despreciados; sin embargo, es interesante comentar que son convencionalmente divididos en dos componentes. Primero se considera que cada anillo de álabes actúa como una fila de toberas y se le atribuye una eficiencia de tobera; en segundo término, cada anillo es analizado según su comportamiento como un deflector del fluido y se le asigna un coeficiente de velocidad (todos estos conceptos han sido definidos anteriormente).

Cuando se desprecian las pérdidas friccionales se tiene,

$$\begin{aligned} \text{Entrada ideal de energía total por etapa} &= \frac{\Lambda_0^2}{2g} - \frac{2(\Lambda_1^2 - \Lambda_2^2)}{2g} \\ &= \frac{2\Lambda_1^2 - \Lambda_2^2}{2g} \end{aligned}$$

Ahora,

$$\Lambda_2^2 = \Lambda_1^2 = \Lambda_0^2 = \Lambda_1^2 + \Lambda_2^2 - 2\Lambda_1\Lambda_2 \cos \alpha$$

Por lo tanto,

$$\text{Entrada ideal de energía total por etapa} = \frac{\Lambda_1^2 - \Lambda_2^2 + 2\Lambda_1\Lambda_2 \cos \alpha}{2g}$$

De acuerdo a la ecuación del momentum, la salida de trabajo

de la etapa está dada por

$$\frac{\lambda_B \Delta \lambda_w}{\varnothing} = \frac{\lambda_B (2 \lambda_1 \cos \alpha_1 - \lambda_B)}{\varnothing}$$

Entonces, la eficiencia de la etapa, definida como la razón del trabajo de salida obtenido a la energía disponible, es

$$\eta_s = \frac{2 \lambda_B (2 \lambda_1 \cos \alpha_1 - \lambda_B)}{\lambda_1^2 - \lambda_B^2 + 2 \lambda_1 \lambda_B \cos \alpha_1}$$

Reacomodando,

$$\eta_s = \frac{2 (\varnothing \cos \alpha_1 - \varnothing^2)}{1 - \varnothing^2 + 2 \varnothing \cos \alpha_1} \quad , \text{ donde } \varnothing = \lambda_B / \lambda_1 \quad \dots (7.28)$$

El valor máximo de  $\eta_s$  puede ser encontrado al derivar  $\eta_s$  con respecto a  $\varnothing$  y al igualar tal operación a cero. El resultado obtenido es

$$\varnothing = \cos \alpha_1 \quad \dots (7.29)$$

el cual, cuando es substituido en la ecuación (7.28), da la máxima eficiencia por etapa, que es

$$\eta_{s \text{ max}} = \frac{2 \cos^2 \alpha_1}{1 + \cos^2 \alpha_1} \quad \dots (7.30)$$

**e) El compresor de flujo axial**

El compresor de flujo axial invariablemente contiene álabes de reacción y es, en la mayoría de los casos, del tipo de 50% de reacción. Esta máquina puede ser comparada a una turbina de reacción funcionando de manera inversa, el trabajo suministrado se transforma en un incremento en la entalpía del fluido con un incremento en su presión.

Cada etapa del compresor axial constituye un anillo de álabes móviles, seguido por un anillo de álabes fijos. Los incrementos en la entalpía y la presión en los álabes móviles son obtenidos a expensas de una reducción en la velocidad relativa del fluido; simultáneamente, sin embargo, la velocidad absoluta del fluido es incrementada en virtud del trabajo suministrado. Este incremento es subsecuentemente destruido por difusión en el anillo fijo antes de que el fluido entre a la siguiente etapa.

Cualquier intento por inducir un incremento demasiado alto en la presión en una etapa, es acompañado por una tendencia del fluido a escapar de las paredes de los pasajes de los álabes divergentes y hacerse turbulento. El trabajo suministrado a una etapa está igualmente limitado, y con éste, el cambio permisible de la velocidad "de giro" del fluido. Por estas razones, a los álabes de un compresor axial se les da una menor curvatura que a los álabes

de una turbina. Esto tiene el doble efecto de restringir el valor de  $\Delta\Lambda_w$  y de forzar al fluido a permanecer en un flujo con línea aerodinámica sobre las superficies de los álabes suavemente curvados. Aparentemente entonces, el compresor axial requiere un mayor número de etapas si se desea producir un apreciable incremento en la presión. La adopción de álabes con un grado de reacción del 50% ayuda a minimizar el número de etapas necesario para permitir el máximo incremento de presión permisible a ser realizado en cada anillo de álabes.

El diagrama de velocidad combinado de la figura 7.10, está hecho de acuerdo con la convención aceptada de medir los ángulos de los álabes del compresor desde la dirección axial.

Aplicando la ecuación de energía para flujo estable al flujo adiabático que atraviesa la etapa se tiene, (el signo negativo del trabajo obedece a la convención tomada en termodinámica según la cual el trabajo es positivo cuando se extrae del fluido, y es negativo cuando se le suministra)

$$-w_u = h_2 - h_0 + \frac{\Lambda_2^2 - \Lambda_0^2}{2g}$$

y si los álabes tienen una forma común de la sección transversal,

$$\Lambda_2 = \Lambda_0 \quad \Delta z', \quad -w_u = h_2 - h_0$$

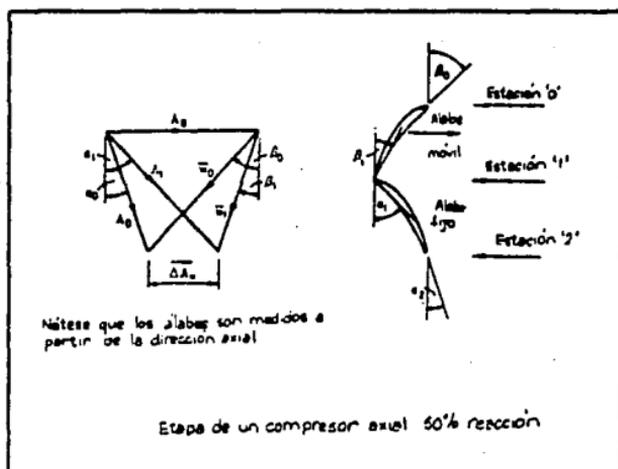


Figura 7.10.

Los compresores axiales son normalmente utilizados para comprimir un gas, casi siempre aire, por lo que es posible escribir,

$$-W_u = c_p (T_2 - T_0)$$

Esta expresión se aplica sea una compresión reversible o no, de modo que si se desea especificar el trabajo en términos del incremento de temperatura isoentrópico, se tiene,

$$-W_u = \frac{c_p}{\eta_s} (T_2 - T_0)$$

donde  $\eta_s$  es la eficiencia isentrópica de la etapa de compresión. Por lo tanto,

$$-W_u = \frac{c_p T_0}{\eta_s} \left[ \left( \frac{P_2}{P_0} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad \dots (7.31)$$

El trabajo por etapa está, además, dado por la ecuación de momentum como

$$-W_u = \frac{\Lambda_B \Delta \Lambda_w}{3} \quad \dots (7.32)$$

La aparición del signo negativo en esta ecuación es compatible con  $\Delta \Lambda_w$  que ahora tiene la misma dirección que  $\Delta \Lambda_B$ . Igualando las expresiones (7.31) y (7.32), se obtiene,

$$\frac{\partial_2}{\partial_3} = \left[ \frac{\eta_s \Lambda_B \Delta \Lambda_w}{3 c_p T_0} - 1 \right] \quad \dots (7.33)$$

### 7.2.2.2. Maquinaria de flujo radial

Aunque la mayoría de las turbomáquinas para fluidos compresibles son del tipo de flujo axial, aún queda una pequeña pero importante minoría que cae dentro de la categoría de flujo radial.

Cuando un fluido fluye a través de una máquina en una dirección radial, la velocidad tangencial en cualquier sección de los álabes varía apreciablemente y en proporción directa al radio en esa sección. No es muy conveniente el encontrar el trabajo transferido desde el rotor como el producto de la fuerza ejercida y la velocidad del álabe, dado que no hay manera simple de determinar el radio al cual la fuerza resultante actúa. Es más sencillo determinar el torque obtenido del rotor debido a que éste es igual, pero opuesto, a la razón de cambio del momento del momentum del fluido que fluye,

$$T = \frac{\dot{m}}{g} \Delta(r \wedge \omega)$$

$$T = \frac{\dot{m}}{g} (r_2 \wedge \omega_2 - r_1 \wedge \omega_1)$$

... (7.34)

La razón de la transferencia de trabajo puede ser encontrada como el producto del torque y de la velocidad angular  $\omega$  del motor

$$W_U = \frac{\dot{m}w}{g} (r_2 \wedge \omega_2 - r_1 \wedge \omega_1)$$

pero,  $r_2 \omega = \wedge_{B_2}$     y     $r_1 \omega = \wedge_{B_1}$

por lo tanto,

$$W_U = \frac{\dot{m}}{g} (\wedge_{B_2} \wedge \omega_2 - \wedge_{B_1} \wedge \omega_1) \quad \dots (7.35)$$

#### a) La turbina centrífuga o de Ljungstrom

La turbina Ljungstrom es del tipo centrífugo, con anillos concéntricos alternados de álabes "contra\_rotación". Es una máquina comparativamente compacta y ligera y su baja inercia termal reduce el periodo de calentamiento preliminar, esencial antes de que cualquier turbina térmica (especialmente las de vapor) pueda trabajar a su máxima carga.

Diagramas de velocidad típicos para este tipo de turbinas se muestran en la figura 7.11. Debido a que el cambio en la velocidad "de giro" (componente tangencial de la velocidad absoluta) no es requerido para el análisis del momentum, no se obtiene ninguna ventaja de la superposición de triángulos. Además, como la veloci-

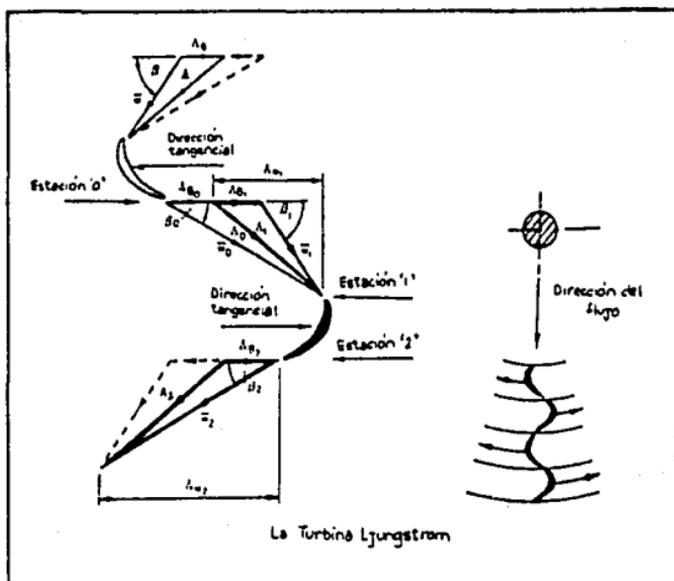


Figura 7.11

dad del álabe a la salida de cada anillo es mayor que la velocidad del álabe a la entrada, los triángulos no pueden ser dibujados a partir de un vector base común. Si todos los álabes son de la misma forma en su sección transversal, entonces los triángulos de velocidad a la salida y a la entrada de cada anillo de álabes, debe ser similar a los respectivos triángulos para cualquier otro anillo de álabes. La velocidad del álabe aumenta progresivamente conforme el fluido se expande a través de la turbina.

El trabajo hecho por cualquier anillo de álabes puede ser calculado aplicando la ecuación (7.35), teniendo cuidado del signo que deba tener  $\Lambda_w$

Si, como se indica en la figura, la velocidad "de giro" en la entrada es opuesta en dirección a la velocidad "de giro" en la salida, entonces la ecuación (7.35), cambia en

$$W_{ij} = \frac{\dot{m}}{g} (\Lambda_{B_2} \Lambda_{w_2} + \Lambda_{B_1} \Lambda_{w_1})$$

El trabajo neto hecho por la turbina es, por supuesto, la suma de cantidades como ésta.

#### b) El compresor centrífugo

El compresor centrífugo tiene numerosas ventajas sobre otras

formas de maquinaria de flujo radial. En una máquina simple, resistente y económica; comprende un impulsor rotante siempre de una sola pieza, seguido por paletas fijas que actúan como difusores. En algunas ocasiones puede ser invertida para dar un servicio efectivo como turbina "centrípeta". Sin embargo, el tener multietapas complica mucho la operación por la complicada trayectoria del flujo entre etapas, y la larga área frontal necesaria, la hace una proposición menos atractiva que un compresor de flujo axial para trabajar en una máquina aérea.

El fluido, generalmente aire, es introducido a la máquina a través de un hoyo anular, u "ojo", localizado en el centro del impulsor que gira rápidamente. El disco impulsor usualmente tiene paletas rectas dispuestas radialmente (las paletas son rectas, teniendo sólo una ligera curvatura en el "ojo", que intenta guiar el aire suavemente dentro del patrón o trayectoria de fluido requerida). Paletas curvas no podrían ser toleradas a velocidades de operación muy altas debido al efecto de "enderezamiento" de la carga centrífuga sobre ellos. El aire que entra es obligado a moverse en un patrón espiral por los álabes rotantes, y la fuerza centrífuga que experimenta causa un incremento de la presión en la dirección radial. Se gana subsecuentemente un incremento adicional de presión por difusión del aire a elevada velocidad en las paletas fijas que rodean al rotor. Muy frecuentemente, el incremento de presión por difusión en el estator es tan grande como aquélla debida a la com-

presión centrífuga en el rotor.

Idealmente, el aire debe dejar el impulsor con una velocidad "de giro" igual a la velocidad de la punta del álabe, pero en realidad, debido a la inercia, el aire tiende a rezagarse o retrasarse por detrás de las paletas y su velocidad "de giro" es, en consecuencia, menor que la velocidad de la punta del álabe.

Este efecto, conocido como "deslizamiento" (slip), puede ser mitigado incrementando el número de paletas en el impulsor. El "factor de deslizamiento" (slip factor) está definido como la razón de real a la ideal velocidad "de giro" del aire a la salida del impulsor.

$$\sigma = \frac{\wedge_{w_1}}{\wedge_{B_1}}$$

El trabajo suministrado al compresor puede calcularse empleando la ecuación (7.35).

$$-W_u = \frac{1}{g} (\wedge_{B_1} \wedge_{w_1} - \wedge_{B_2} \wedge_{w_2})$$

Es generalmente razonable suponer que el aire que entra a través del "ojo" lo hace en una dirección axial y así no posee ninguna velocidad "de giro" inicialmente; por tanto,

$$-W_u = \frac{\wedge_{B_1} \wedge_{w_1}}{g}$$

$$-W_u = \frac{\sigma \Lambda_{s_1}^2}{g} \quad \dots (7.36)$$

Quando la ecuación de energía es aplicada a todo el proceso adiabático, se encuentra que,

$$-W_u = h_2 - r_0 + \frac{\Lambda_2^2 - \Lambda_0^2}{2g}$$

Y si las paletas del difusor desaceleran el aire a aproximadamente la velocidad de entrada, entonces,

$$-W_u = h_2 - r_0$$

Este resultado es similar al obtenido de una consideración de una etapa de compresión en una máquina de flujo axial y puede ser, obviamente, expresado de la misma manera

$$W_u = \frac{c_p T_0}{g} \left[ \frac{p_2}{p_0} \right]^{k-1} \quad \dots (7.31)$$

Las ecuaciones simultáneas (7.31) y (7.36), pueden ser combinadas para fijar una expresión para la razón total de compresión de un compresor centrífugo

$$\frac{p_2}{p_0} = \frac{h_2 - r_0}{c_p T_0} \quad \dots (7.37)$$

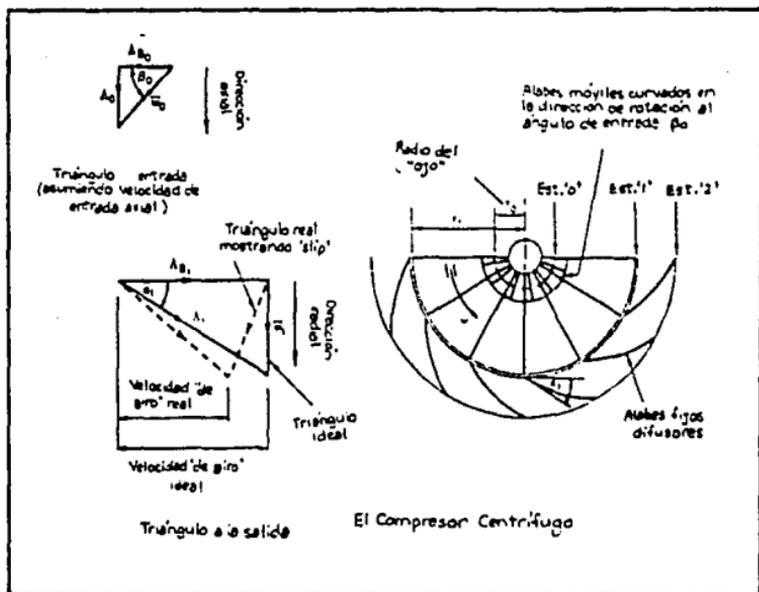


Figura 7.12.

### 8. Componentes de una turbina de gas

Para alcanzar el rendimiento más alto posible, cada operación esencial de la turbina de gas, establecidas según el ciclo Brayton, es realizada por un componente separado, el cual está especialmente diseñado para la ejecución de tal operación: la energía es liberada en una cámara de combustión; la expansión y la compresión ocurren en turbounidades individuales.

Conforme con ello, en forma esquemática, una turbina de gas consta de (considerando una unidad operando en ciclo abierto):

- 1) un compresor de aire,
- 2) una cámara de combustión,
- 3) una turbina, y
- 4) varios dispositivos auxiliares y/o accesorios como:
  - a) sistemas de combustible: tuberías, conexiones, bombas, sistema de control (válvulas de cierre, reguladores, etc.)
  - b) sistema de lubricación<sup>1/</sup>: bombas, tuberías, válvulas, etc.
  - c) chumaceras, cojinetes, engranes, etc.
  - d) sistema de arranque
  - e) diversos controles como: de arranque, de aceleración y para-

---

<sup>1/</sup> Debido a la alta velocidad con que gira la flecha de la turbina, la lubricación en todo el motor debe ser absolutamente confiable

da, de protección a la sobrevelocidad o exceso de temperatura, etc.

Una descripción breve de los tres primeros componentes, que son los de mayor importancia, se presenta a continuación.

### 8.1. Compresores

En las turbinas de gas, para llevar a cabo la fase de compresión, se utilizan dos tipos básicos de compresores: axial y centrífugo (véase apartado turbomaquinaria).

En el tipo centrífugo, el aire es tomado en el centro, alrededor del eje, y viaja radialmente hacia afuera, recibiendo energía del rotor en la forma de incremento de presión y velocidad.

El incremento de velocidad es considerable, posiblemente represente la mitad del incremento total de energía. Para ser transformada en presión, se hace pasar el flujo por un difusor estacionario, que presenta áreas de paso crecientes en dirección radial.

En este tipo de compresores se requieren altas velocidades del gas y del rotor para la presión elevada. Las razones de presión (relaciones entre las presiones al inicio y al final del proceso de compresión) están normalmente limitadas a 4/1 o 5/1

El compresor centrífugo es robusto y relativamente barato, pero su eficiencia no es tan alta como la de un compresor axial

equivalente. Es empleado en turbinas de gas de baja potencia de salida. En las máquinas de pequeña potencia también se utilizan compresores de rueda mixta, que es parcialmente centrífuga y parcialmente axial.

En comparación con el axial, el compresor centrífugo es más estable en operación.

Las eficiencias de diseño varían entre 0.78 y 0.82. La eficiencia se incrementa con incrementos en la razón de presiones.

El compresor de flujo axial consiste en una serie alternativa de álabes fijos y móviles. Los álabes móviles dan energía al aire. Los álabes fijos actúan como difusores para convertir energía cinética a presión y dirigir el aire en un ángulo adecuado hacia el rotor.

Numerosas etapas, cada una consistente de un rotor y un estator, son requeridas según la razón de presión total que se desee alcanzar.

La construcción multietapa hace que el compresor de flujo axial sea relativamente más costosa que el centrífugo equivalente. Es, además, más susceptible a dañarse o deteriorarse como resultado de la admisión de basura, arena, y otros objetos extraños. Sin embargo, tiene las siguientes ventajas en comparación al centrífugo:

- 1) el caudal es más alto,
- 2) pueden alcanzar elevadas eficiencias (excepto en pequeños tamaños, es más eficiente que el tipo centrífugo equivalente);

- 3) son estables en un amplio rango de operación;
- 4) tienen una mayor facilidad para la fabricación en serie.

Confirmando el punto (2), las eficiencias varían de 0.82 a 0.95. Esta aumenta con incrementos en la razón de presión.

Este tipo de compresor puede, eventualmente, hallarse dividido en dos etapas: una de baja presión y otra de alta presión, con refrigeración intermedia.

No obstante, los dos tipos de compresores presentan un límite de inestabilidad de tipo mecánico (pumping limits). Cuando el flujo de aire cae por debajo de este límite a cualquier velocidad del rotor, el flujo se hace inestable, debido a la circulación secundaria creada en los pasajes de los álabes. Esta inestabilidad se manifiesta con pulsaciones, las cuales pueden dañar los álabes, incluso romperlos, con las consecuencias desastrosas resultantes. Los compresores axiales tienen mayores problemas con flujos bajos, en consecuencia, son frecuentemente "abiertos" a la atmósfera en una etapa intermedia durante el arranque, para inducir un mayor flujo de aire y evitar daños.

Es de gran importancia en una turbina de gas que el rendimiento del compresor sea lo más elevado posible para que consuma la mínima energía y, en consecuencia, el trabajo útil a obtener de la turbina (trabajo proporcionado por la turbina menos el proporcionado al compresor) sea máximo.

## 8.2. Cámaras de combustión

En las cámaras de combustión se desarrolla la fase de aporte de calor en las turbinas que operan en ciclo abierto.

En términos comunes, cada motor cuenta con varias cámaras (en función del espacio disponible y de condiciones de diseño como la eficiencia de la combustión, la caída de presión, la distribución balanceada del flujo y de la temperatura), todas ellas encerradas en un cuerpo constituido generalmente de acero al carbono, y colocadas entre el compresor y la turbina.

Estos componentes son fabricados de aleación refractaria de elevada calidad. Suelen tener, además, un revestimiento aislante externo.

Cada una de ellas contiene (comúnmente al centro de la parte anterior de la cámara misma) un inyector para introducir el combustible en proporción al flujo de aire, pulverizándolo muy finamente para obtener una eficiente combustión.

El aire comprimido proveniente del compresor entra en el cuerpo central que encierra las cámaras de combustión. Estas están diseñadas para soportar una combustión eficiente del combustible, resistir los efectos de la elevada temperatura y enfriar la mezcla a un perfil predeterminado de temperatura al mantener baja la temperatura de la pared con una adecuada película de enfriamiento. En los diseños se busca también bajos niveles de emisión de contaminan-

tes al aire.

En la cámara, la carga térmica es muy elevada, algunos millones de kilocalorías por m<sup>3</sup>/hr. Sin embargo, también el excedente de aire es muy alto<sup>1/</sup> por lo que la temperatura de los gases a la salida no supera los 800°C.

Un parámetro muy importante en el diseño de una cámara de combustión está representado por la distribución de aire alrededor del inyector de combustible que tiene que producir una fuente de propagación de combustible constante, en el cual la velocidad del gas debe ser más baja que la velocidad de propagación de la llama.

La forma geométrica debe ser la adecuada para que se permita una mezcla perfecta de aire y productos de combustión y con esto se obtenga una temperatura uniforme al ingreso a la turbina. Se fabrican casi exclusivamente en forma cilíndrica o troncocónica para resistir mejor la elevada presión interna.

El flujo de aire debe ser uniforme y estar dentro de ciertos límites porque de lo contrario se puede crear una presión diferencial sobre la configuración de la cámara, y que puede ocasionar efectos laterales desastrosos, en la misma cámara y en los álabes de la turbina.

---

<sup>1/</sup> Se estima que sólo aproximadamente del 25% al 30% del aire contribuye a la oxidación del combustible.

A pesar de todo, el diseño de combustores, como también se conoce a la cámara de combustión, es empírico en elevado grado porque la combinación de factores químicos y de dinámica de fluidos es muy compleja. Hay ciertas reglas generales que ayudan al diseño inicial, como aquella que fija el tamaño mínimo de un combustor para ciertas condiciones dadas o aquella que fija los métodos básicos para la mezcla de aire y combustible. Sin embargo, la correcta combinación de cualidades, deben ser obtenidas al construir y probar varios diseños.

El sistema de combustión de las turbinas de gas se complementa con: bujías para la ignición, detectores de flama, tubería, etc.

### 8.3. Turbinas

En la turbina es donde propiamente se convierte la energía térmica de los gases de combustión en energía mecánica. Esta es un expansor en el que los gases se aceleran en los pasajes entre los álabes; esta condición proporciona un flujo suave y pocas pérdidas por fricción. Se llegan a alcanzar eficiencias mecánicas de 0.87 a 0.90.

Una descripción más detallada del funcionamiento de las turbinas de flujo axial o de tipo centrífugo se presenta en la sec-

ción destinada a la turbomaquinaria de este trabajo.

Ahora es importante comentar que las turbinas empleadas en la práctica son generalmente del tipo de flujo axial; sin embargo, en tamaños pequeños, la turbina centrífuga es común, por las mismas razones que la de los compresores centrífugos ya expresadas.

Se emplean turbinas de flujo simple, es decir, con entrada de gas por un extremo y descarga por el extremo opuesto; o de doble flujo, en las que el gas entra por la parte central y sale por los dos extremos.

Es frecuente que la turbina se encuentre dividida en dos partes para tener una expansión en varias etapas lo que permite la disminución de la velocidad de rotación y, con ello, de la fuerza centrífuga en los álabes. Se pueden tener, también, cámaras de combustión intermedias para incrementar la eficiencia térmica del ciclo.

#### 8.4. Características estructurales

Algunas características estructurales que pueden comentarse de una turbina de gas son las que a continuación se mencionan:

Las exigencias especiales, respecto a la constitución de

una turbina de gas, se derivan de las elevadas temperaturas de trabajo. Actualmente existen materiales que, a temperaturas de hasta 1 000°C, poseen aún suficiente resistencia. Por enfriamiento de los álabes, pueden conseguirse incluso temperaturas de entrada a la turbina de hasta aproximadamente 1 300°C, que corresponden a los gases de la combustión. Sin embargo, deben evitarse cambios bruscos de temperatura, porque los materiales empleados tienen tendencia a la formación de grietas. Para este tipo de solicitaciones se ha introducido la denominación de "choque térmico" (que se define y detalla exactamente en el capítulo de materiales). Con la introducción de materiales de alta resistencia al calor no se resuelven, sin embargo, todos los problemas constructivos derivados de las altas temperaturas de trabajo. Hay que luchar principalmente con las dilataciones térmicas, que exigen una construcción con suficiente garantía de resistencia y rigidez.

Por estas consideraciones, el rotor de la turbina se acopla casi siempre articulado con el rotor del compresor. De esta forma, los esfuerzos axiales de la turbina los absorbe el cojinete fijo del rotor del compresor, de tal manera que el de la turbina sólo irá guiado en un apoyo libre suplementario. Este apoyo debe colocarse, en lo posible, inmediatamente delante del primer disco de la turbina. Este arreglo permite, además, una mayor facilidad de mantenimiento.

Los cojinetes de las turbinas, generalmente del tipo de bolas o rodillos, están sometidos a temperaturas de hasta aproximadamente 300°C. Exigen aceros resistentes al calor<sup>1/</sup> y estar continuamente bañados por el lubricante, que sirve al mismo tiempo como refrigerante. Para evitar el calentamiento de los cojinetes a causa del "calor que almacenan" los discos, se debe dejar a las turbinas trabajar en vacío, o sea, marchar en frío durante algunos minutos antes de las paradas. Un sobrecalentamiento del rotor de la turbina, especialmente de los álabes, por un exceso, por ejemplo, de alimentación de combustible, debe evitarse colocando los adecuados elementos de seguridad. Generalmente, por mencionar un caso, se emplean materiales termorresistentes que adquieren una coloración permanente, según la temperatura alcanzada, de tal suerte que al realizar las revisiones periódicas puede conocerse si han existido sobrecalentamientos.

Las cubiertas o carcasa de una turbina de gas son hechas, frecuentemente, de acero al carbono, empleando fundición y maquinado. Estas deben ser diseñadas para soportar los esfuerzos causados por la presión de los gases, las deformaciones y los efectos de las expansiones. En efecto, la carcasa debe ser suficientemente rígida para no recargar a los árboles del rotor y a sus apoyos con

---

<sup>1/</sup> Cuando la temperatura de trabajo no excede los 150°C, los aceros del tipo 1.0C, 1.45Cr pueden utilizarse sin ninguna dificultad. Para temperaturas mayores es necesario acudir a los aceros rápidos de herramientas, como el clásico 18\_4\_1 u otros tipos Cr\_Mo\_V y Cr\_Mo\_W\_V

esfuerzos suplementarios producidos por torsiones de la caja. En unidades multietapas, deben contar, además, con paredes intermedias que permitan conseguir buena "estanqueidad" entre escalones, conjuntamente con otros dispositivos laberínticos.

La carcasa suele tener diversos revestimientos que le servirán para ser refrigerada y como protección contra la alta temperatura y efectos oxidantes y corrosivos del gas, y contra algunos efectos de dilatación de álabes (fijos y móviles).

A la carcasa se fijan, además de los diafragmas, diversos dispositivos auxiliares del motor, como cajas de engranes destinadas a accionar las bombas de combustible o de engrase u otros componentes de servicio

En muchas unidades, las carcasas se encuentran divididas en su plano central horizontal y unidas, ambas partes, con pasadores, para tener fácil acceso para las operaciones de inspección, montaje y mantenimiento.

#### 8.4.1. Compresor

El rotor del compresor axial de una turbina de gas (el más frecuente) consta, generalmente, de discos separados<sup>1/</sup>, uno para

---

1/ Los discos a que son sujetos los álabes constituyen una pieza circular con un barreno en el centro y un anillo exterior de espesor variable, en la periferia del cual se maquinan (generalmente empleando fresado) ranuras para insertar los álabes. En ocasiones se suele hacer maquinado para acabado en el cubo de los barrenos de un disco.

cada etapa, montados en caliente sobre una flecha.

Los discos de las primeras etapas son, en ocasiones maquinados a partir de piezas forjadas de aluminio o de aleaciones de titanio; mientras que los discos de las últimas etapas son hechas de piezas forjadas de acero inoxidable (capaz de resistir las altas temperaturas que se alcanzan a la salida del compresor) y tratadas térmicamente. Los discos también pueden ser unidos directamente, por medio de una cuña ajustada, a la flecha de la turbina.

La flecha, por su parte, es generalmente maquinada a partir de una pieza de aleación forjada.

Los álabes del rotor del compresor son fabricados por forja hasta el tamaño y forma deseados y fijos a las orillas de los discos por medio de raíces con colas de milano trapezoidales u otro dispositivo de unión (véase el apartado de álabes).

Las formas adoptadas de los álabes del compresor son varias y se determinan, bien por el cálculo, bien experimentalmente; haciendo, desde luego, diversas consideraciones de esfuerzos.

Algunos tipos de compresores tienen el rotor cónico con todos los álabes de igual longitud, de modo que la sección de flujo va estrechándose desde la entrada hasta la salida, de acuerdo con la disminución del volumen específico del aire conforme fluye a

través del compresor.

Otros tipos de compresores tienen el rotor cilíndrico, mientras que los álabes se tornan menos largos a medida que aumenta la compresión

Debido a que el compresor trabaja a temperaturas menores que las presentes en la turbina (las temperaturas en un compresor típico, con una razón de compresión de 12:1 y con una eficiencia de 80 a 90%, el aire que entra a la temperatura del cuarto, dejará el compresor a 315 \_ 350°C), hay un mayor rango de materiales que pueden ser usados en la fabricación de sus componentes.

El material de los álabes del compresor debe tener una buena resistencia a la fatiga, baja densidad (debido a que una parte considerable de los esfuerzos es de origen centrífugo) y aceptable resistencia a la corrosión y erosión.

Las aleaciones ligeras de buenas características en caliente, como la 2618(Al), pueden ser empleadas, debido a su baja densidad, hasta temperaturas del orden de 225°C y los productos de aluminio sinterizado (SAP), hasta 250 \_ 275°C. Asimismo, las aleaciones modernas de magnesio pueden ser útiles hasta unos 250°C. Para temperaturas mayores, se usa ampliamente en los motores actuales el acero inoxidable AISI 403 (13Cr, C < 0.15), pero su baja relación resistencia a la fluencia/densidad, hace que su empleo no sea con-

veniente por encima de los 400°C.

La utilización de las aleaciones de titanio en el compresor puede dar lugar, en el caso de elevadas relaciones de compresión, a un ahorro hasta del 20% del peso total del motor. A temperaturas superiores a unos 450°C, su empleo está limitado por la susceptibilidad a la oxidación y rápida caída de las características de fluencia.

Los aceros de baja aleación resistentes al calor, tales como el 17\_22S (Cr\_Mo\_V), poseen unas características elevadas en el margen 425 \_ 550°C, pero requieren una protección adecuada contra la oxidación, debiendo ser a su vez la capa protectora resistente a la erosión.

Con objeto de reducir el número y estilo de los diferentes álabes requeridos en un compresor multietapa, los tipos son estandarizados en 2 o 3 patrones. El número, los ángulos de "tambaleo" (stagger angles) y el peso, son cambiados para acomodarse a las condiciones buscadas.

Los álabes del estator del compresor axial, por su parte, pueden ser forjados y acabados hasta el tamaño y forja apropiadas; sujetos con raíces a cola de milano sobre anillos divididos que forman diafragmas y que son, a su vez, ensamblados dentro de la carcasa del motor.

Los álabes fijos, dado que no son sometidos a esfuerzo rota-

cional, pueden ser hechos de material diferente al usado en los álabes móviles, sin embargo, suelen serlo del mismo.

El rotor de un compresor centrífugo, por otro lado, puede ser maquinado a partir de piezas forjadas de aluminio.

Para ilustrar lo expresado del compresor, véase la figura 8.1.

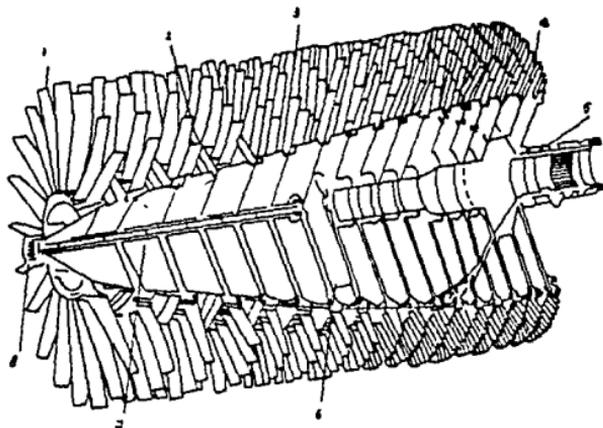
#### 8.4.2. Cámara de Combustión

Los materiales empleados en la manufactura de cámaras de combustión están sometidos a temperaturas muy elevadas (de 500 a 1 000°C). En cambio, los esfuerzos mecánicos son, normalmente pequeños.

Las principales causas que pueden conducir a la inutilización de una cámara son: su insuficiente resistencia a la oxidación, deformaciones producidas por tensiones debidas a gradientes térmicos. Otra posible causa de rotura puede ser, eventualmente, la fatiga debida a vibraciones transmitidas por la corriente de aire procedente del compresor.

La propiedad que se toma como determinante en la elección

Rotar del compresor



1, lobes móviles del compresor; 2, disco; 3, y 4, anillos intermedios  
5, muñón posterior; 6 y 7, quita de aire; 8, muñón delantero

Carcasa del compresor



9, carcasa anterior con aletas fijas orientables para regulación;  
10, anillo intermedio (correspondiente a la etapa intermedia),  
11, carcasa posterior con aletas fijas

Figura 8.1.

de un material a emplear en una cámara de combustión es la resistencia a la oxidación. Sin embargo, la resistencia al choque térmico y a la fluencia deben ser aceptable, así como una buena soldabilidad y facilidad de conformación.

Los materiales más comúnmente empleados son: Nimonic 75, Discaloy, N<sub>155</sub>, Inconel, etc.; y diversos aceros inoxidables austeníticos.

La figura 8.2 ilustra una cámara de combustión característica.

#### 8.4.3. Turbina

El rotor de la turbina axial (de uso más frecuente) puede ser del tipo de discos montados sobre la flecha del rotor, o constituido por una serie de discos entrelazados, conectados mutuamente por juntas dentadas circulares o por soldadura.

Cada rueda, constituyendo una etapa, es hecha, en cualquier caso, de un simple disco al que son ensamblados los álabes.

A través del rotor existe una amplia variedad de esfuerzos

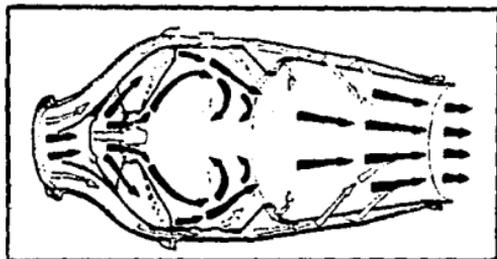


Fig. 8.2. Corrientes de aire primaria y secundaria en una cámara de combustión única (la corriente secundaria está marcada por flechas huecas)

y temperaturas que a su vez dependen, al menos en parte, del material con que hay sido construido, es decir de su densidad, coeficientes de conductibilidad y dilatación y módulo elástico.

Las temperaturas máximas, en el borde exterior, están comprendidas entre 500 y 650°C, según el tipo de motor, mientras en las proximidades del eje son del orden de 200\_300°C. Esto da lugar a elevadas tensiones térmicas que vienen a sumarse a las de origen centrífugo.

Los máximos esfuerzos tangenciales se presentan cercanos al centro del disco, es decir, en puntos donde la temperatura no es muy elevada. En el borde exterior, la combinación de esfuerzos tangenciales y radiales, unido a la mayor temperatura, exigen que el material posea buena resistencia a la fluencia.

Prácticamente todos los discos del rotor de la turbina de gas son forjados.

El rotor de una turbina se ilustra en la figura 8.3, mostrando sus principales componentes.

Los materiales más comúnmente empleados en la construcción de estos componentes son:

aceros ferríticos de baja aleación como el H\_40 y el 17\_22S hasta temperaturas no superiores a 550°C. Para temperaturas más elevadas

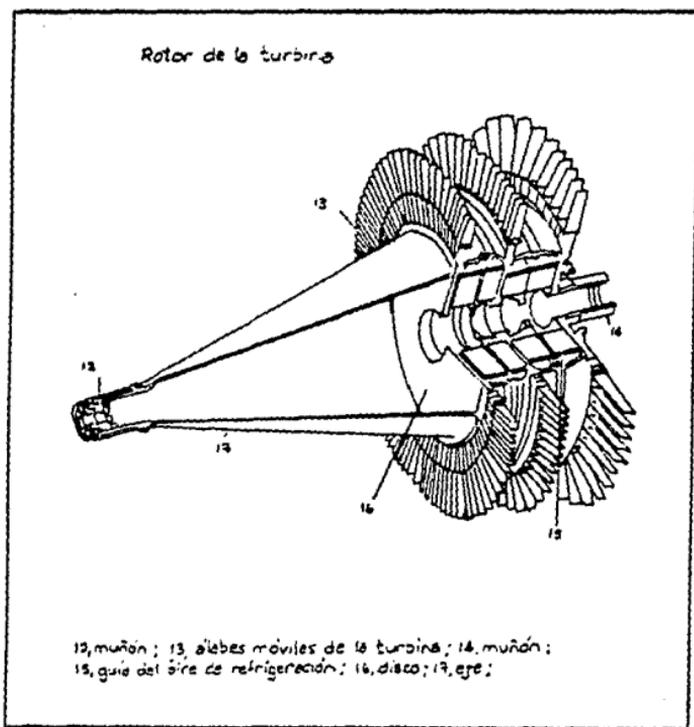


Figura 8.3.

son excelentes los aceros del tipo H<sub>46</sub> (12Cr, Mo, W, V), que reúnen un buen comportamiento a la oxidación con adecuadas características mecánicas. Cuando el borde del disco alcanza temperaturas de 600°C, son preferibles los aceros inoxidable austeníticos del tipo 18\_8 con molibdeno y niobio. A partir de los 625\_650°C, o cuando los esfuerzos en el borde son muy elevados, se emplean superaleaciones del tipo Fe\_Cr\_Ni y Fe\_Cr\_Ni\_Co como Discaloy, A<sub>286</sub>, 16\_25\_6, etc.

Algunos fabricantes como General Electric Co., manufactura discos formados por un anillo (o corona) de 16\_25\_6, soldado a un disco de acero ferrítico (Cr\_Ni\_Mo) y esta combinación ha resultado satisfactoria.

Para permitir el incremento en el volumen del gas conforme se expande, los álabes que se ensamblan al disco del rotor pueden ser:

- 1) de altura constante y montados en un rotor con forma cónica;
- 2) de altura variable y montados en un rotor cilíndrico.

Los álabes móviles de la turbina son sometidos a elevadas temperaturas (650 \_ 800°C) y esfuerzos (tangenciales y centrifugos), por lo que el material empleado en su manufactura debe reunir diversas características que se detallan en el capítulo dedicado a los álabes de la turbina. Por ahora, se menciona que los álabes son hechos de aleaciones resistentes a las altas temperaturas, como su-

peraleaciones a base níquel y cromo, con adición eventual de cobalto, molibdeno y wolframio; o de aceros inoxidable. Generalmente son forjados o fundidos. Su diseño implica cálculo y experimentación. Una parte crítica de estas piezas es la raíz, por medio de la cual se fija el álabe al anillo o corona del disco del rotor.

En todas las etapas de la turbina, los álabes tienen una raíz prolongada. Esta construcción defiende al borde del disco y a la raíz del álabe de las elevadas temperaturas del chorro principal del gas y mejora las condiciones de vibración del álabe. Los álabes móviles suelen ser unidos en su extremo superior para reducir la vibración. Toda esta información se detalla en el capítulo dedicado a los álabes.

Los álabes fijos, o toberas, que son necesarios en cada etapa de una turbina suelen ser moldeados a precisión. La justificación de esto es la complejidad de su forma y la exactitud requerida en la misma.

Estos álabes son soportados por anillos o discos estacionarios, llamados diafragmas, que, a su vez, se conectan a la cara interna de la carcasa de la turbina. Este arreglo evita que el gas caliente tenga contacto directo con la carcasa de la turbina, minimizando la transferencia de calor a la carcasa. En realidad, estos discos se dividen en dos, una mitad se fija en el fondo de

la carcasa de la turbina, y la otra mitad lo es en la parte superior de la misma. Estos diafragmas soportan hasta 1 000°C.

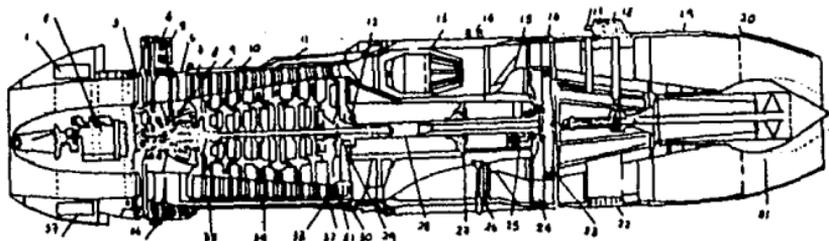
Los álabes fijos de la turbina son las piezas componentes del motor que son sometidas a las máximas temperaturas. Por esta razón deben construirse con materiales altamente resistentes al calor, como se detalla en el apartado especial sobre álabes que se incluye posteriormente.

La figura 8.4 ilustra una turbina de gas para aviación en la que se señalan las partes más importantes que la componen a fin de visualizar un motor térmico completo.

#### 8.4.4. Enfriamiento

Las raíces de los álabes (fijos y móviles) y los discos de la turbina de gas deben ser enfriados. Esta operación se verifica, generalmente, por aire extraído del compresor, liberado, filtrado y enfriado en un intercambiador de calor externo y entonces conducido al rotor de la turbina. Este aire se mezcla con los gases de la combustión, pasando a través de los canales de los álabes, y se extiende como un velo por delante de los puntos amenazados de los discos de la turbina y de los álabes, debiendo actuar, sobre todo, en las proximidades de la raíz de los álabes. Véase la figura 8.5.

Turbina de gas por evisación



1, tanque de combustible para el motor de arranque; 2, motor de pistón para el arranque;  
 3, engranaje distribuidor para el accionamiento de mecanismos; 4 y 5, accionamiento de mecanismos; 6, carcasa de entrada del compresor; 7, cono directriz anterior; 8, apoyo delantero del rotor; 9, carcasa del compresor; 10, alabe directriz del compresor; 11, desviación del aire de refrigeración (para la turbina); 12, apoyo posterior del rotor; 13, tubo de llenado; 14, soporte del motor; 15, guía de entrada de la turbina; 16, álabes de marcha de la turbina; 17, accionamiento por servomotor para ajuste tobera de empuje; 18, engranajes de ajuste; 19, envuelta exterior de la tobera de empuje; 20, conducción del aire de refrigeración; 21, cono regulable de la tobera; 22, castillo de refuerzo de la envuelta interior de la tobera de empuje; 23, disco de la turbina; 24, álabes conductores de la turbina; 25, bomba de retorno para el lubricante; 26, soporte de la cámara de combustión; 27, apoyo anterior de la turbina; 28, acoplamiento del rotor; 29, bulón de tensión para el disco del compresor; 30, carcasa de entrada de la cámara de combustión; 31, obturación laberíntica; 32, conducción de retorno del lubricante; 33, 34 y 35, álabes del compresor; 36, bombas para el lubricante; 37, depósito para el combustible

Figura B.4.

Para temperaturas máximas de entrada a la turbina, se fabrican álabes huecos, tanto fijos como móviles, según se ve en la figura 8.6. Esta figura da, al mismo tiempo, un ejemplo de álabes directores con banda cubridora (véase comentario en la sección descriptiva de los álabes) para conseguir una relación conveniente de vibraciones y disminuir las pérdidas de chorro por volteo en los extremos de los álabes.

El enfriamiento permite tener una larga vida y una alta eficiencia operativa (debido a que un sofisticado sistema de enfriamiento permite operar con una alta temperatura del gas de entrada a la turbina, manteniendo temperaturas menores en el metal).

Algunos productores de turbinas hacen fluir aire frío y presurizado a través de la cubierta del motor proporcionando así una reducción de la temperatura de la pared de la cubierta.

#### 8.5. Disposiciones de las turbinas de gas

Las turbinas de gas pueden construirse para funcionar con un solo eje o con varios. Esta decisión está en función, principalmente, de las necesidades específicas del usuario.

Las máquinas de un solo eje, que se ilustran esquemáticamente

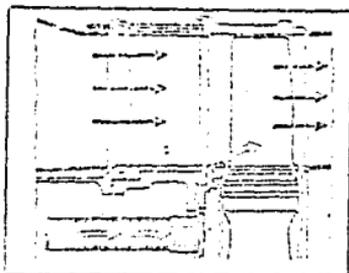


Fig. 8.5. Refrigeración por aire en una etapa del rotor de una turbina a, laberinto

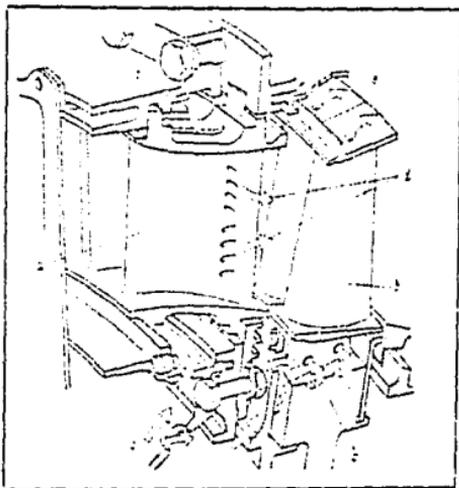


Fig. 8.6. Escalón de una turbina con álabes huecos refrigerados; a, álabe director; b, álabe del rotor; c, entrada del aire de refrigeración; d, salida del aire de refrigeración; e, banda cubridora

te en la figura 8.7(a), son las más simples y usadas, con todos sus elementos giratorios en operación semejante a la de un ensamble sencillo; otras ventajas de esta disposición ya han sido comentadas. Esta construcción se ajusta mejor a aplicaciones de velocidad constante, como impulso de generadores, movimiento de bombas y compresores y otros; además de su sencillez mecánica, resulta más económica. Comparada con una máquina con doble eje, por ejemplo, el requerimiento de potencia y torque del arrancador para este tipo de disposición es mayor; esto es debido a que dicho mecanismo tiene que arrancar y acelerar toda la masa giratoria de la máquina y el equipo que ésta mueve.

Las máquinas de ejes múltiples (en la figura 8.7(b) se ilustra esquemáticamente una turbina de dos ejes), por su parte, pueden tener turbina de potencia neta por separado, ya sea en serie o en paralelo, con una o más turbinas impulsando al compresor. La mayor ventaja de un arreglo de eje múltiple es el amplio intervalo de velocidades que le es posible alcanzar, y que pueden arreglarse para mejorar el rendimiento térmico a cargas parciales.

El rotor de una turbina de gas, en cualquier caso, debe ser dinámicamente balanceado en los talleres, empleando una máquina balanceadora apropiada. Un ajuste final puede ser hecho, si es necesario, después de que la turbina ha sido probada en el banco de prueba a la velocidad de operación, mediante el ajuste de los

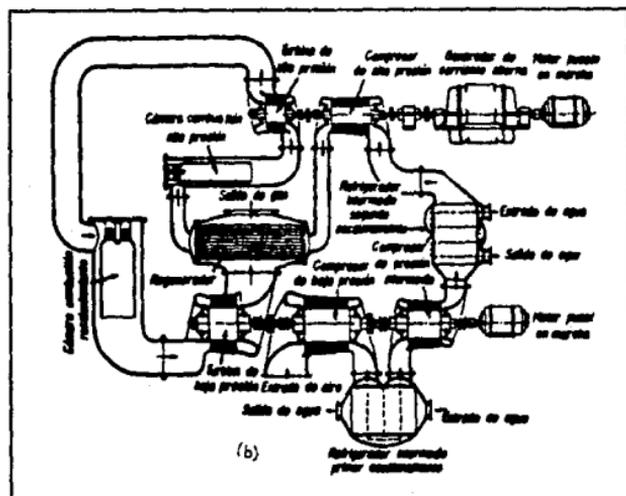
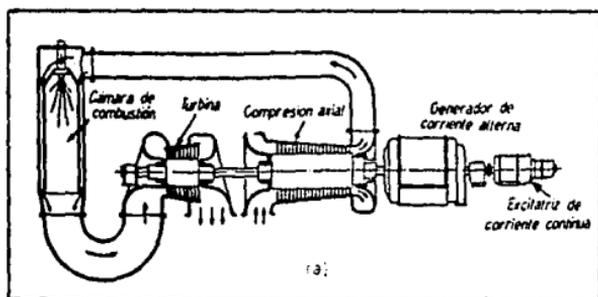


Figura 8.7. Turbina de gas de ciclo abierto :  
a, monoje  
b, bieje

pesos balanceadores sin necesidad de desmontar la máquina.

La importancia de un balanceo adecuado se establece al reconocer que el desbalanceo crea fuerzas centrífugas que crecen con el cuadrado de la velocidad de rotación creando vibraciones que pueden llegar a destruir el equipo. Por ello, el mantenimiento de las turbinas debe comprender un programa de revisión continua, o al menos periódica de las vibraciones.

#### 8.6. Condiciones de diseño

La potencia de una turbina depende de la masa de flujo y de la carga adiabática. Esta última es una medida de la energía del gas o aire disponible para la expansión y se encuentra, claramente, en función de la temperatura y la relación de presiones.

Con temperatura y presiones fijas, la potencia de una turbina determinada sólo puede variarse con la masa del flujo.

Los fabricantes de turbinas de gas suelen proporcionar curvas de características de funcionamiento de sus unidades como la que se ilustra en la figura 8.8.

Los fabricantes de turbinas de gas realizan sus diseños estimando determinadas condiciones de presión y temperatura del

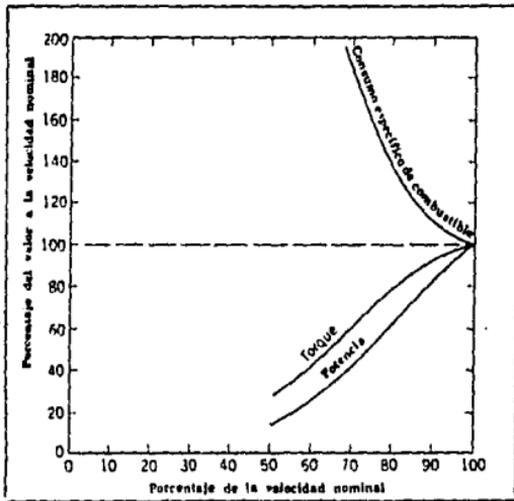


Fig. 8.8. Curvas de características de funcionamiento para una máquina de un eje de ciclo abierto sencillo

ambiente. Sin embargo, cuando las unidades son instaladas y empleadas por los diferentes usuarios, estas condiciones varían teniéndose, en términos muy generales, los siguientes casos:

- 1) al registrarse un incremento en la temperatura del gas de entrada al motor, disminuye la masa del flujo por el compresor y la turbina; además, disminuye también la relación de presiones del compresor;
- 2) al incrementarse la temperatura de entrada al compresor, la temperatura de descarga del mismo también aumenta y, como consecuencia, puede agregarse menos energía por combustión a este aire menos denso para producir una determinada temperatura de entrada a la turbina;
- 3) por los efectos mencionados, al incrementarse la temperatura ambiente, la potencia total producida por la máquina disminuye debido a una menor masa de flujo y a una relación de presión más baja;
- 4) al registrarse una disminución de la presión ambiente, el funcionamiento de la turbina de gas también disminuye debido a la menor densidad del aire, que da por resultado menor masa del flujo a través de la máquina;
- 5) la potencia producida por la máquina, en función de la altitud del lugar de instalación, varía directamente en relación de las presiones atmosféricas absolutas. Así, si una unidad produce 100 hp al nivel del mar (760 mm Hg abs.) un día de 26°C,

producirá aproximadamente 83 hp a 1 525 m de altitud (632 mm Hg abs.) un día de 26°C de ambiente (estos datos han sido obtenidos por la American Gas Association después de numerosas observaciones y experimentaciones);

- 6) en conclusión, el funcionamiento de las máquinas, como el flujo de extracción de aire del compresor, la presión de aire del compresor, la potencia y el consumo de combustible, varían directamente con los cambios de presión absoluta ambiental;
- 7) las pérdidas (caída de presión) en el escape de la turbina (contrapresión) también tienen un efecto apreciable en el funcionamiento de la turbina; el grado de dicho efecto debe ser estimado por el fabricante y manifestado a los usuarios.

Por las condiciones mencionadas, los constructores de turbinas de gas suelen proporcionar a sus clientes curvas de corrección de características para diferentes altitudes y temperaturas.

En relación al arranque de una turbina de gas se puede comentar lo siguiente:

Al inicio, el motor fija su funcionamiento a una velocidad menor a la normal empleando, para ello, un motor eléctrico o algún otro tipo arrancador disponible (empleando un embrague si es necesario). A esta velocidad, el combustible y el aire suministrados a la cámara de combustión son encendidos por una bujía eléctrica

y hay la suficiente diferencia de presión entre el compresor y la turbina que permite que la velocidad del sistema sea autosostenida. La máquina puede entonces alcanzar la máxima velocidad sin una ayuda posterior del motor arrancador inicial.

Conforme la carga es aplicada al generador, la velocidad es mantenida por incrementos automáticos del combustible y aire suministrados. Hay un punto particular de condiciones de marcha en el que la planta opera a su máxima eficiencia (carga plena de diseño).

La secuencia de arranque de una turbina de gas sólo toma unos pocos minutos. En la figura 8.9, se ilustra una de estas secuencias.

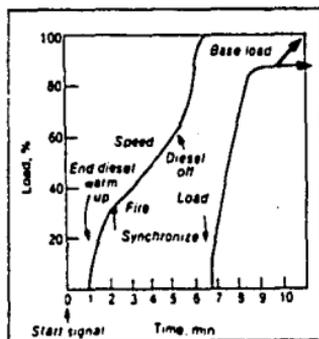


Figura 8.9. Secuencia de arranque de una turbina de gas

### 9. Combustibles para turbinas de gas

La turbina de gas presenta, como una ventaja muy importante, una enorme flexibilidad en cuanto al combustible a emplear en su accionamiento. Este puede ser sólido, líquido o gaseoso. Esta ventaja cobra una mayor importancia en una visión futurista al considerar la necesidad de diversificar las fuentes de energía ante la cada vez menor disponibilidad de los combustibles fósiles, principalmente petróleo y gas natural. La tendencia que se observa en este sentido es la de emplear todos los residuos posibles, carbón y combustibles sintéticos.

La selección del combustible a emplear en una determinada turbina, obedece a diversos factores como: disponibilidad, precio, consideraciones ambientales, ciclo de operación, etc.

En las instalaciones de ciclo abierto, los productos de la combustión entran en contacto directo con los álabes de la turbina y con las superficies del intercambiador de calor (si está presente). Esta situación exige un combustible para el cual los productos de la combustión estén relativamente libres de cenizas corrosivas y de residuos sólidos que puedan erosionar o depositarse en las superficies del motor.

Los combustibles que se han empleado mayormente en estas

unidades son: gas natural, gas de refinería (butano y propano), gas de alto horno y destilados del petróleo; también se han empleado los líquidos livianos residuos de la primera destilación del petróleo (virgin naphta).

La crisis del petróleo que se inició en 1973, ha hecho que se utilicen combustibles más baratos que generalmente tienen una combustión o manejo más difícil, y mayor contenido de contaminantes atmosféricos o corrosivos de las partes calientes. Ejemplos de estos combustibles son: el petróleo crudo y diversos residuos pesados de destilación. Los inconvenientes principales que pueden estar relacionados con el uso de estos combustibles son la elevada viscosidad, que puede ser tratada con un calentamiento oportuno, y la presencia de materiales corrosivos como sodio, potasio y vanadio. Para eliminar o disminuir estos inconvenientes, se realizan numerosos estudios.

El sodio y el potasio, por ejemplo, suelen ser lavados con agua en instalaciones adecuadas. El vanadio no puede ser económicamente extraído; su acción corrosiva se controla mediante la colocación de aditivos a base de magnesio (que forma compuestos con el vanadio con un punto de fusión superior a la temperatura del ingreso en turbina, bloqueando la corrosión), o mediante la aplicación de revestimientos adecuados sobre los álabes de las primeras etapas de la turbina.

Es interesante comentar, ante lo expuesto, que el uso de

combustibles residuos lo dicta la búsqueda de diferenciación de fuentes de abastecimiento y reducción de costos; sin embargo, este último punto es parcialmente neutralizado por la necesidad de realizar mayores inversiones en la instalación del equipo de tratamiento y el complejo sistema de almacenamiento, y por los costos de funcionamiento del mismo equipo.

El empleo de carbón pulverizado como combustible de estas unidades se planteó desde hace varias décadas, pero se frenó por los problemas, sobre todo de erosión, que ocasionaba. Actualmente vuelve a tomar impulso al desarrollarse técnicas tendientes a separar y eliminar las cenizas volantes antes de que pasen a través de la turbina, donde desgastarían rápidamente los álabes.

Dentro de poco se presentarán en el mercado combustibles sintéticos, como el carbón licuado, gas de carbón con alto poder calorífico, hidrógeno y derivados vegetales renovables, como alcohol metílico y etílico. Se trata de combustibles limpios (desarrollados en la búsqueda de sustitutos a las fuentes naturales no renovables hasta ahora mayormente empleados y cuya disponibilidad oportuna y económica es cada vez menor), que pueden ser usados en las turbinas de gas a ciclo abierto, después de realizar algunas modificaciones en el sistema de combustión y de introducción del combustible.

En turbinas de ciclo cerrado; en las que el fluido de traba-

jo es invariable con respecto a los combustibles usados, sin problemas de corrosión en los álabes de la turbina; es satisfactorio el empleo de combustibles gaseosos, destilados livianos y pesados del petróleo y carbón. La erosión de las cenizas no es mayor problema por la pequeña velocidad de los gases de combustión sobre las superficies del intercambiador de calor empleado como "fuente de calor" externa. Los problemas de corrosión, por su parte, se trasladan a elementos estáticos donde es más sencillo controlarlos (aumentando la sección de la pieza, por ejemplo; cosa que no es posible en partes giratorias (como los álabes) porque la fuerza centrífuga a que serían sometidos aumentaría más que proporcionalmente)

Los problemas energéticos que ya se han comentado, exigen el poder utilizar los más variados combustibles fósiles o de recuperación; sólidos, líquidos o gaseosos, como carbón y descartes de madera, residuos del petróleo, gas a bajo poder calorífico y baja presión (provenientes estos últimos de diversas plantas químicas), etc.; para estos casos, el empleo de turbinas de gas operadas en ciclo cerrado es una interesante opción.

## 10. Características de una turbina de gas

Teóricamente, las turbinas de gas, respecto de los motores alternativos de combustión interna, presentan notables ventajas, como:

- 1) mayor ligereza a paridad de potencia<sup>1/</sup>
- 2) ausencia de vibraciones
- 3) uniformidad del par
- 4) consumo reducido de lubricante
- 5) elevado rendimiento mecánico debido al hecho de que la energía se transmite a órganos giratorios sobre cojinetes de bolas
- 6) encendido directo
- 7) mayor flexibilidad de combustible (véase apartado correspondiente)

Por el contrario, se presentan dificultades prácticas como:

- 1) la limitación de temperatura máxima impuesta por la resistencia de los materiales disponibles, y que representa eficiencias térmicas pobres en el ciclo simple
- 2) la necesidad del envío a la turbina de elevadas cantidades de

---

<sup>1/</sup> Esto es porque cada operación esencial de la turbina tiene lugar en flujo estable, lo que hace posible el desarrollo de elevadas velocidades de flujo (muy superiores a las tenidas en las máquinas reciprocantes) que, consecuentemente, hacen que la unidad tenga una razón energía/peso mayor que la de una máquina recíprocante equivalente.

aire para poder mantener la temperatura de los gases dentro de los límites convenientes a los materiales; esta condición, si por una parte tiene la ventaja de producir una combustión perfecta; por otra, obliga a aumentar las dimensiones del compresor, que, al final, viene a absorber de las 2/3 a las 3/4 partes de la potencia generada por la turbina.

Al compararse con una turbina de vapor, en su empleo en plantas productoras de energía, la de gas también presenta ventajas, como:

- 1) instalación más compacta<sup>1/</sup>: menor tamaño del motor<sup>2/</sup>,  
empleo de menos dispositivos auxiliares, ya que no necesitan ni condensador ni sistema de agua de enfriamiento
- 2) lubricación más sencilla
- 3) escape más limpio<sup>3/</sup>
- 4) relación peso/potencia más pequeña
- 5) mayor flexibilidad de combustible (véase apartado correspondiente)

- 
- 1/ Esta cualidad se traduce en bajo costo inicial, y en gran capacidad para iniciar rápidamente operaciones
  - 2/ Dada su habilidad para presurizar el fluido de trabajo
  - 3/ Que resulta muy conveniente dados los controles ambientales cada vez más estrictos exigidos por las autoridades

6) encendido directo

Las desventajas más importantes que pueden mencionarse son:

- 1) la turbina de gas no es conveniente para la operación con cargas parciales (presente, por ejemplo, cuando las condiciones operativas de la planta son muy variables) porque su eficiencia cae rápidamente conforme la carga se reduce. La caída es como consecuencia de la reducción de la razón de presión y temperatura y que exige mayor trabajo de compresión<sup>1/</sup>
- 2) mayor consumo de combustible<sup>2/</sup>

Una característica muy importante de una turbina de gas y que le concede ventajas y un futuro prometedor a nivel industrial y de producción de energía eléctrica, es su enorme potencial como parte de un sistema de energía total.

El concepto de dicho sistema puede resumirse al decir que contempla el desarrollo completo de los requerimientos de calor, luz, fuerza y potencia mecánica de una planta, conjunto de edificios o de una región completa, por medio de la generación in situ y del aprovechamiento máximo de cualquier calor sobrante para todas las necesidades de energía de la unidad considerada.

- 
- 1/ La turbina de gas tiene una de sus más importantes aplicaciones en plantas generadoras a las que sirven de apoyo en sus servicios de carga máxima (véase utilidades)
  - 2/ Este problema, sin embargo, se resuelve en gran medida con la compresión y expansión múltiples, combinados con la regeneración

La importancia de este concepto involucra ahorros importantes y se torna vital al considerar la situación de crisis en la economía del mundo actual la cual, además de exigir una severa racionalización en el uso de cualquier forma de energía, obliga a observar el mayor ahorro posible en la utilización de los combustibles y demás fuentes no renovables (cada vez más costosos y difíciles de obtener), mediante la optimización de su conversión en energía útil. De hecho, la tendencia de las plantas generadoras de energía en la actualidad, es la de adoptar ciclos combinados gas\_vapor y ciclos de generación mixta (cogeneración). En estos sistemas, el calor de desecho de un proceso se convierte en fuente de energía para un proceso de conversión subsecuente. El calor de escape de una turbina de gas, por ejemplo, puede ser "recuperado" por medio de una caldera denominada "de recuperación" para la producción de agua caliente o vapor. Estos productos pueden emplearse directamente en procesos industriales o para calefacción, o para hacer funcionar una instalación de desalinización del agua de mar, etc.. Por otra parte, el vapor puede expandirse en una turbina de vapor para obtener energía mecánica o electricidad. Como ejemplo de las posibles combinaciones turbina de gas, caldera de recuperación, turbina de vapor que se han empleado hasta ahora con éxito, se mencionan en la figura 10.1

Estas plantas:

- 1) hacen mejor uso del combustible y de la energía generada repre-

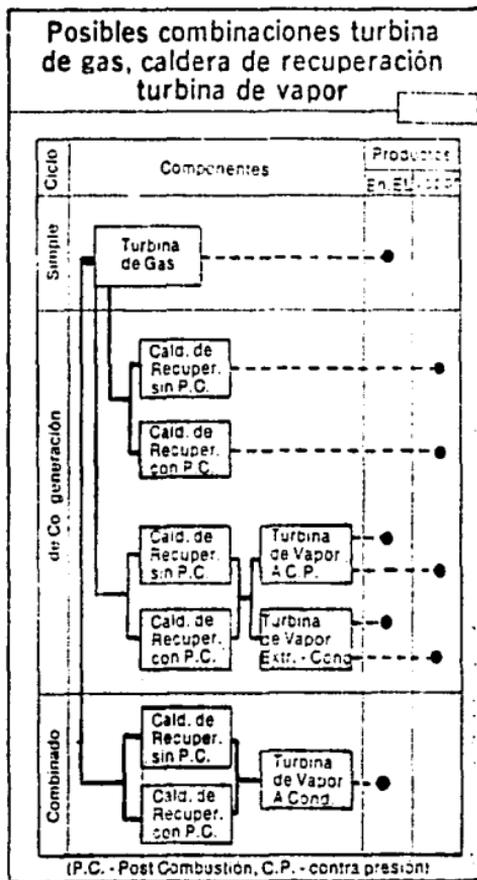


Figura 10.1.

sentando ahorros;

- 2) reducen el consumo de combustibles no renovables;
- 3) disminuyen la emisión de contaminantes a la atmósfera lo que constituye enormes beneficios ecológicos;
- 4) reducen el calor disipado a los alrededores;
- 5) producen para el usuario, en el caso de la cogeneración, dos tipos de energía utilizable: electricidad y vapor o agua caliente para otras aplicaciones;
- 6) representan ahorros de espacio.

Sin embargo, la determinación de la conveniencia o no de una planta como éstas en un caso específico requiere de una detallada consideración económica. Se involucran enormes ahorros, como ya se ha comentado, pero, a pesar de todo, éstos pueden verse parcial o totalmente neutralizado por mayores inversiones en la adquisición e instalación del equipo adicional.

## 11. Utilización de la turbina de gas

La turbina de gas es un motor muy versátil. Tiene numerosas aplicaciones, principalmente en aeronaves, generación de energía eléctrica, accionamiento mecánico para utilizaciones industriales, de locomoción, etc., como se detalla a continuación:

### 11.1. Aeronaves

La industria de la navegación aérea ha originado muchos de los adelantos logrados en el diseño de unidades motrices de turbina de gas. Las limitaciones de espacio y de peso inherentes a un motor de aviación hacen de la turbina de gas el propulsor ideal debido a su capacidad de desarrollar altas potencias con un volumen pequeño y con un peso comparativamente muy reducido.

La turbina de gas de un motor aeronáutico de propulsión a chorro (turbojet) suministra trabajo para impulsar al compresor. El compresor está precedido por un difusor que es un conducto divergente cuya finalidad consiste en disminuir la velocidad y aumentar la presión del aire. Los gases de escape que salen de la turbina se expanden en una tobera de impulso, aumentando así su velocidad de salida en dirección opuesta al movimiento del motor. El cambio en la velocidad del fluido que entra y sale de la unidad turbogas origina una fuerza dinámica de reacción ejercida sobre la aeronave que la hace avanzar. Las máquinas con propulsión a chorro son más

eficientes a elevadas altitudes y grandes velocidades del aire; son particularmente convenientes y apropiadas para las aeronaves militares que exigen un desempeño excelente del motor, y capacidad para producir una enorme cantidad de energía. En casos de emergencia, la energía que impulsa la aeronave puede ser aumentada aún más con la ayuda de un quemador posterior, el cual adiciona calor a los gases justo antes de que entren a la tobera de escape. Este calentamiento posterior incrementa la velocidad de salida de los gases y hace mayor el empuje de la máquina que le hace avanzar.

En un motor aeronáutico turbohélice (turboprop), la turbina de gas impulsa al compresor y a un propulsor convencional, es decir, una hélice. De esta manera, la aeronave experimenta dos empujes: el proporcionado por la hélice y el producido por la fuerza reactiva del chorro que sale de la tobera de escape de la máquina. Así es posible combinar la ventaja del despegue corto, inherente a una aeronave impulsada por hélice, con las capacidades de vuelo más veloz y alto de una máquina convencional con propulsión a chorro.

#### 11.2. Generación de electricidad

En el campo de la generación de electricidad, la turbina de gas no puede competir, en lo que se refiere a capacidad y eficiencia termodinámica, con la turbina de vapor (esta última puede alcanzar una potencia unitaria de hasta 1 500 MW y eficiencias de 40%). La turbina de gas, máquina de potencia media (alcanza, en

unidades de ciclo abierto una potencia unitaria máxima de 150 MW y eficiencias del 30%), encuentra, sin embargo, tres aplicaciones especiales en dicho campo que se mencionan a continuación:

- 1) operación en combinación con plantas generadoras de energía con turbinas de vapor, buscando incrementar la eficiencia total;
- 2) para apoyo y servicio de carga máxima;
- 3) para plantas portátiles generadoras de energía.

Una planta de ciclo combinado gas\_vapor para la generación de energía eléctrica, es aquella en la que los gases de escape a temperatura elevada de una turbina de gas convencional se emplea, ya sea para suministrar oxígeno al horno de una caldera en lugar de aire de combustión precalentado (esta combinación es posible porque los gases que escapan de una turbina de gas aún contienen cerca del 80% del oxígeno del aire suministrado por el compresor a la entrada), o para precalentar el agua antes de su entrada en el generador de vapor. Tales arreglos son capaces de incrementar substancialmente la eficiencia total de una planta, con la consecuente mejor utilización del combustible. Representa, sin embargo, un mayor costo de instalación que debe ser evaluado.

La turbina de gas, por otra parte, ofrece una opción atractiva para proporcionar energía adicional para carga pico (máxima) o cuando se requiere apoyo o reserva. Pueden ser instaladas en los nudos del sistema, en las subestaciones de distribución local,

facilitando la llegada de las cargas sin sobrecargar las líneas de distribución principales. Para estos propósitos, la turbina de gas ofrece las ventajas de una instalación de menor costo que dispositivos de vapor o hidroeléctricos, una operación virtualmente automática, simplicidad, menores requerimientos de espacio y mantenimiento mínimo.

Otra aplicación similar es para el servicio de elevación de la tensión eléctrica al final de la línea en líneas de transmisión a larga distancia.

La turbina de gas es también utilizada para plantas portátiles generadoras de energía; esto porque puede ser montada en carros de ferrocarril o embarcada para trasladarla a lugares donde se requiera energía de emergencia.

Por sus características, la turbina de gas resulta también una instalación muy conveniente en lugares donde no existe la disponibilidad de agua (que la turbina de vapor, por ejemplo, necesita para enfriamiento). Lo mismo sucede en instalaciones requeridas en tiempo breve, para compensar demoras en los programas de construcción de otras centrales en instalaciones donde la simplicidad de funcionamiento es la condición fundamental.

## 11.2. Industria

Una temprana y aún importante aplicación de la turbina de

gas en la industria está en conexión con el proceso Houdry para la refinación de petróleo. En esta utilización, aire bajo presión debe ser pasado periódicamente sobre un catalizador con el propósito de quemar el carbón acumulado durante el proceso de refinación. El aire empleado, entonces, es calentado de la misma manera como puede serlo en una cámara de combustión y puede, por lo tanto, ser pasado a través de una turbina para obtener trabajo útil, incluyendo el necesario para impulsar el compresor empleado para el suministro de aire al catalizador. El resultado es una turbina de gas con la operación de quemado de carbón sustituida por una cámara de combustión.

Otra aplicación industrial de la turbina de gas es la instalación de estos motores a lo largo de las conducciones de gas natural (gasoductos) para mover compresores centrífugos que "empujan" el gas y así es transportado hasta las estaciones de servicio. Las estaciones pueden estar ubicadas en cualquier lugar a lo largo de las líneas de conducción porque no es necesario ningún suministro de agua. Además, pueden construirse estaciones totalmente automáticas que prácticamente no requieren supervisión y sólo exigen un mínimo de mantenimiento.

Actualmente en la industria del petróleo, la turbina de gas produce energía, mueve compresores de aire y de gas en las refi-

nerías, proporciona aire o gases de escape para procesos, y en los campos petrolíferos mueve compresores y bombas necesarios para la extracción del combustible.

Una turbina de gas, por otra parte, sin su propio compresor o cámara de combustión puede ser usada para recuperar energía de los gases calientes de desperdicio producidos por la industria petroquímica o alguna otra industria de proceso; o de los gases de escape de una máquina de diesel o gasolina. En estos casos, toda la potencia desarrollada por la turbina puede ser empleada en la realización de diversos trabajos.

Por su parte, en la industria del acero, las turbinas de gas se utilizan para mover compresores de aire, para producir electricidad y para suministrar aire para procesos tales como el funcionamiento de altos hornos. El combustible principal en estas aplicaciones es gas de alto horno, con un número de unidades dispuestas para funcionar con dos tipos de combustible.

Para la industria minera, la turbina de gas presenta la ventaja de reducido tamaño y resultante movilidad, excelente para el accionamiento de bombas y compresores, equipo para movimiento de tierra, etc.

#### 11.4. Locomoción

Un campo de aplicación de las turbinas de gas que recibió considerable atención en los años cincuentas, fue la locomoción de ferrocarril.

Las ventajas que tienen las turbinas de gas para este servicio son: la suavidad de operación, la simplicidad de funcionamiento y la no necesidad de agua.

Aunque varias unidades se han utilizado, hasta ahora han sido incapaces de reemplazar la locomoción diesel, ante todo, por la baja eficiencia térmica, que representa un excesivo consumo de combustible. Se realizaron intentos para superar esta desventaja económica al desarrollar una turbina de gas que quemara carbón; sin embargo, las dificultades de ingeniería fueron muy grandes. No obstante, se continúan realizando avances buscando una máquina más exitosa en esta aplicación.

#### 11.5. Marina

En el campo de la propulsión de barcos, la turbina de gas ofrece ventajas de peso ligero y menores requerimientos de espacio que los que corresponden a una caldera y a una turbina de vapor.

Las instalaciones de turbina de gas para la marina varían desde unidades pequeñas para la propulsión de barcos rápidos y de poco tonelaje, producción de corriente de emergencia, producción de energía y propulsión de dragaminas, rompehielos, producción de humos, bombas de incendio, aplicaciones de energía neumática, hasta

grandes motores de propulsión combinados con turbinas de vapor.

Algunas de estas unidades trabajan con aceite residual como combustible, después de tratarlo con un equipo especial.

#### 11.6. Automotriz

Las ventajas de la turbina de gas para aplicaciones automotrices son su operación suave y con pocas vibraciones, alto poder a velocidades bajas, peso ligero, poco requerimiento de espacio, la ausencia de la necesidad de un sistema de enfriamiento, y la posibilidad de quemar combustible más barato que la gasolina.

Las desventajas que presenta para esta misma aplicación son: alto costo de manufactura y de materiales; elevado consumo de combustible, especialmente a carga parcial; elevado nivel de ruido y características de pobre aceleración.

Durante los años sesentas, los trabajos sobre máquinas con pequeñas turbinas de gas hechos por los productores de automóviles, ofrecieron buenas expectativas para que muchas de las desventajas encontradas fueran superadas.

El desarrollo de nuevas técnicas de fundición, hicieron posible la fabricación de ruedas completas para el compresor y la turbina, eliminando así los altos costos que implica el maquinado individual de cada componente. Además, las mejoras de los regeneradores rotatorios y el uso de otros esquemas, tales como la tobera

ajustable de la turbina y diseños viejos, mejoraron enormemente el consumo de combustibles registrado tanto para operación a plena carga y a carga parcial. Adicionalmente, estos esquemas han dado a las máquinas mejores características de aceleración.

Numerosos vehículos de prueba han sido construidos y operados con una gran variedad de combustibles, registrándose buenos desempeños, mejores que los de las máquinas automotrices convencionales. Sin embargo, pocas unidades han sido usadas de esa manera; la mayoría lo son en camiones, tractores y maquinaria pesada para el movimiento de tierra, y en utilizaciones militares.

La turbina de gas da por resultado una planta energética con escape más limpio. Ello porque no produce tantos hidrocarburos no quemados y tanto monóxido de carbono como las máquinas recíprocas. El proceso de combustión en la turbina de gas, además, minimiza la formación de óxidos de nitrógeno en el escape. Estas consideraciones adquieren importancia adicional con la imposición de estándares más elevados de calidad ambiental.

## 12. Mantenimiento y reparación general

### 12.1. Generalidades sobre mantenimiento

Toda maquinaria y equipo industrial se halla expuesto al desgaste y deterioro por su uso. Ello implica la necesidad de realizar actividades de mantenimiento para asegurar el funcionamiento eficiente del mismo.

#### **Mantenimiento correctivo**

Cuando las máquinas o equipos se averían en servicio, su reparación es conocida como mantenimiento correctivo. Durante muchos años este tipo o filosofía de mantenimiento era la que se observaba en las diferentes plantas industriales. Todavía sigue siendo importante, pero resulta muy costoso parar una operación o una línea de producción mientras se verifican las reparaciones.

#### **Mantenimiento preventivo**

Por inspecciones frecuentes, para determinar los síntomas de fallas inminentes, éstas son anticipadas y el trabajo correctivo se programa para cuando la producción sea floja. Así, se evitan costosas pérdidas de tiempo en muchas reparaciones. También son programadas revisiones continuas de acuerdo con fichas de la historia de la vida de los particulares aspectos relativos a la máquina. En lugar de continuas reparaciones, para sacar el mejor partido

al poner las máquinas averiadas en marcha, la mayor parte del trabajo de mantenimiento programado. Las piezas que requieran reemplazo o rehabilitación vistas por la inspección, pueden ser localizadas y compradas por adelantado (lo que implica tener un almacén de piezas y partes) y las verdaderas reparaciones necesarias no interrumpen la producción.

El mantenimiento preventivo es una ventaja sobre el mantenimiento correctivo en muchas circunstancias. Sin embargo, no es una panacea, requiere tiempo para la inspección, un sistema de recolección de datos y un tiempo para analizarlos. La cuantificación del costo de estas funciones no existe prácticamente, o es insignificante en el mantenimiento correctivo. Bajo circunstancias en las cuales los riesgos de pérdida por inesperadas paradas son bajos, puede ser menos costoso, quizá, usar sólo el mantenimiento correctivo con un sostenimiento eficaz del equipo. El criterio esencial es el costo comparativo para un departamento o fábrica particular. A menudo, tal comparación indica una mezcla de ambos programas.

En unidades de vida útil programada, los diseñadores suelen tomar medidas tendientes a facilitar las actividades de mantenimiento de la maquinaria.

#### 12.2. Mantenimiento de una turbina de gas

Los requerimientos de mantenimiento y reparación general

de una turbina de gas, como para cualquier tipo de máquina, los determinan hasta cierto punto los requerimientos de cada instalación. Igualmente las diferentes marcas y tipos de turbinas variarán de acuerdo con los objetivos de diseño.

Los factores primordiales relacionados directamente con el mantenimiento de tales unidades son: el ciclo de trabajo, la calidad del combustible y el medio ambiente; como se explica brevemente a continuación:

#### **Ciclo de trabajo**

Las partes de secciones calientes de una turbina de gas están diseñadas para operar en un amplio rango de temperaturas. Los requerimientos de inspección y mantenimiento serán, sin embargo, incrementados si están sometidas a choques térmicos que se producen con las variaciones extremas de carga.

**Frecuencia de los arranques.** El número de arrancadas puede considerarse un factor importante en los requerimientos generales de mantenimiento. Entre más frecuentes sean las arrancadas y paradas de una turbina de gas, más frecuentemente estarán los componentes de la máquina sujetos a ciclos térmicos. Algunas veces el arranque de la máquina puede producir temperaturas más altas que las temperaturas normales de operación. Este último, llamado "arranque caliente", produce esfuerzos térmicos anormales en los componentes de la máquina.

**Temperatura de entrada a la turbina.** Las turbinas de gas están diseñadas para operar a niveles altos de temperatura para obtener la eficiencia máxima. El descubrimiento y empleo de aleaciones resistentes a altas temperaturas (véase capítulo de materiales) en los últimos años ha aumentado grandemente la duración y funcionamiento de los componentes llamados "calientes" (que incluyen piezas como las cámaras de combustión, boquillas y álabes, tanto fijos como móviles, de la turbina). Los máximos de temperatura excesiva y la operación prolongada arriba de las temperaturas máximas recomendadas, aumenta los requerimientos de inspección y reparación de estos componentes.

**Registro de temperatura excesiva.** El choque térmico ocurre hasta cierto grado durante cada arrancada de la máquina y cada cambio de (carga) potencia. Por lo tanto, no puede eliminarse, pero puede controlarse con una atención estricta a la reducción de la temperatura máxima de arranque. El evitar los grandes choques térmicos es responsabilidad del operador o de un sofisticado equipo automático. El registro de temperaturas excesivamente altas de la corriente de gases calientes, si ocurren con frecuencia, es muy importante con respecto a la inspección y mantenimiento apropiados. La inspección inmediata después de ese funcionamiento defectuoso puede evitar reparaciones costosas.

#### **Calidad del combustible**

Las necesidades de mantenimiento de una turbina de gas de-

penden, en gran medida, de la calidad del combustible empleado (aspecto que ya se ha comentado en el apartado correspondiente).

Los combustibles líquidos (como los destilados de petróleo) y los gaseosos (naturales o manufacturados) son los de uso más frecuente en motores a ciclo abierto, debido a que se consideran los de mayor limpieza.

La presencia de impurezas corrosivas y erosivas en el combustible utilizado (problema más frecuente y de mayor importancia en los combustibles líquidos, haciendo referencia a los mencionados) afecta en forma adversa la vida y el funcionamiento de la máquina. En general, las unidades que queman gases limpios requieren menos mantenimiento que aquéllas que utilizan destilados como combustibles

Para la realización de los programas de mantenimiento, es necesario conocer la composición del combustible a emplear, la cantidad y características de las impurezas que se encuentren presentes en él y que pueden dañar los componentes.

#### **Medio ambiente**

En general, el medio ambiente de una instalación de una turbina de gas no es un factor crítico si se supone que se seguirán los procedimientos apropiados de mantenimiento. La calidad del aire de entrada a la máquina, sin embargo, es importante.

El flujo de aire a través de la máquina tiene tres funciones principales: para la combustión, para el enfriamiento interior, y como flujo de masa a través de la turbina para el desarrollo de

energía.

Las impurezas en el suministro de aire de la máquina, como el polvo y el humo, se pueden depositar en la máquina y reducir su eficiencia. Las partículas abrasivas que pueden pasar por la máquina tienden a rayar o erosionar los álabes. Las sustancias químicas extrañas en el suministro de aire se pueden depositar en los componentes del compresor y pueden causar corrosión o picaduras en las partes interiores de la máquina.

Los álabes sucios del compresor pueden causar pérdidas del flujo de aire y de potencia, así como temperatura de arranque excesiva. La contaminación que se acumula en los álabes (fijos y móviles) del compresor, es generalmente debida a las impurezas provenientes del medio ambiente. El efecto de la contaminación en el funcionamiento de la máquina es gradual, esto porque la acumulación ocurre lentamente. Sin embargo, el problema puede advertirse inmediatamente por el aumento de las temperaturas máximas de arranque y la pérdida de potencia útil.

Generalmente se colocan filtros en los conductos de entrada de aire al compresor para proteger a la máquina de las impurezas del aire. Estos filtros retienen polvo, humo y otras impurezas comunes, así como los objetos más grandes que pueden causar daños serios. Los depósitos de partículas extrañas en los componentes del motor pueden eliminarse inyectando un agente limpiador como la cáscara de nuez molida a la corriente de aire de entrada. Generalmente, un compresor sucio limpiado por cáscaras de nuez molida

volverá la máquina a su operación normal si no existe algún otro problema. En algunos casos, hasta un 10% de la pérdida de potencia de la máquina puede recuperarse limpiando el compresor de esa manera sin recurrir al desarme del motor.

#### **Procedimiento de mantenimiento de turbinas de gas**

En las operaciones de mantenimiento de una turbina de gas, los procedimientos pueden describirse bajo la siguiente clasificación: inspección, investigación de fallas, reparación, mantenimiento, reparación general y cambio de unidades y su reparación.

Como ya se mencionó al describir el mantenimiento preventivo, la planeación del mantenimiento es importante para:

- 1) poder disponer del soporte técnico necesario
- 2) poder programar la compra de repuestos, y así evitar peligros de sobrecarga de los almacenes de tales piezas y el peligro de no tenerlos a disposición en el momento justo en que se requieran para hacer una reparación y que resultarían en grandes incrementos en los costos totales
- 3) poder elegir los períodos más aptos, técnica y económicamente, para efectuar inspecciones periódicas, teniendo en consideración los períodos de menor necesidad de energía.

Esta planeación exige la elaboración de documentos (de re-

gistro y control) que deben contener, entre otras informaciones,

- 1) número de arranques de la unidad
- 2) horas de funcionamiento de la unidad
- 3) características de funcionamiento (temperaturas, caudales, etc.)
- 4) actividades de mantenimiento a que ha sido sometida.

Cada fabricante de máquinas recomienda sus propios procedimientos; sin embargo, la naturaleza general de cada operación de mantenimiento se describe brevemente a continuación:

### **Inspección**

Las inspecciones de rutina pueden incluir el examen visual de las líneas exteriores, conexiones y soportes de la máquina. Se debe prestar atención a las señales de vibración de la máquina que pueden haber causado daños visibles. La turbina de gas normalmente no está sujeta a vibración de baja frecuencia (que se espera en una máquina de tipo reciprocante); sin embargo, en caso de daño por objetos extraños a los álabes del compresor o la turbina, puede resultar una vibración de muy alta frecuencia y amplitud muy pequeña, que puede ser peligrosa. En general es prudente mantener una comprobación continua o muy frecuente de la vibración de la máquina con instrumentación apropiada.

El primer paso de álabes del compresor generalmente se puede inspeccionar para localizar daños o acumulación de polvo con bastan-

de facilidad. Ciertas atmósferas industriales pueden formar un depósito aceitoso de polvo que puede causar una pérdida de potencia y un aumento en el consumo de combustible. También se puede encontrar erosión de los álabes por partículas de arena u otro material extraño.

El último paso de álabes de la turbina deberá examinarse por si hay daños, y su estado puede ser un indicio del estado de otras etapas o pasos.

Las cámaras de combustión, álabes de entrada a la turbina y las boquillas de combustible, deberán examinarse si las temperaturas de la turbina están arriba de la normal. Esto puede ser debido a suciedad en una boquilla de combustible o por deterioro de los álabes de la turbina por la operación con temperatura excesiva. Es importante que se reponga inmediatamente una boquilla de combustible defectuosa porque puede resultar un daño muy serio si continúa la operación del motor con exceso de temperatura.

La máquina puede arrancarse muy lentamente sin flujo de combustible para examinar si hay ruidos extraños de las chumaceras o baleros principales, o si hay interferencia excesiva o roce de los sellos de aire.

### **Investigación de fallas**

Algunos de los detalles típicos de la investigación de fallas en las turbinas de gas pueden ser los siguientes:

**Pérdida de potencia.** La pérdida de potencia y el alto consumo de combustible puede producirlos un depósito de suciedad en los álabes del compresor por el polvo arrastrado por el aire. Este puede limpiarse fácilmente introduciendo un material limpiador en la entrada del compresor mientras está trabajando la máquina. Los álabes dañados de la turbina pueden causar problemas similares. Temperatura baja de entrada a la turbina y flujo bajo de combustible pueden indicar un control de combustible defectuoso.

**Vibración.** Se verifica si hay vibración de alta frecuencia con instrumentos apropiados. Esta vibración puede causar la una condición de roce excesivo entre el rotor de gran diámetro y un sello, o entre los extremos de los álabes y la carcasa. La vibración también resulta de una condición de desbalanceo, que generalmente proviene de álabes dañados en la turbina o en el compresor.

**Temperatura de entrada a la turbina.** Ya que la turbina de gas es sensible a la temperatura excesiva de entrada a la turbina, puede ser necesario, algunas veces, registrar la temperatura durante un ciclo de arranque o verificar la distribución de tempera-

tura circunferencial para determinar si una boquilla o una cámara de combustión está funcionando mal. También puede requerir examen el sistema de control del combustible.

**Falla en el arranque.** Un control de combustible defectuoso o la falta de ignición son las razones comunes que originan la falla en el arranque. La mayoría de las máquinas tienen dos bujías para el encendido, aún cuando pueda haber mayor número de cámaras de combustión. Sólo se necesita una bujía para iniciar la combustión y la flama viaja luego por tubos cruzados a todas las cámaras de combustión.

#### **Reparación.**

Generalmente, los componentes principales y los accesorios son fácilmente accesibles. Muchos diseños también son adaptables a técnicas de reparación seccionada. Por lo tanto, la reparación frecuentemente se ejecuta reponiendo componentes o quitándolos para llevarlos al taller de reparación o de reacondicionamiento. En algunas máquinas es posible quitar una porción de la cubierta y reponer los álabes dañados en el lugar de la instalación si sólo se trata de un grupo limitado. Esto generalmente se hace reponiendo cada álabe con otro que tenga el mismo "momento de equilibrio".

#### **Mantenimiento**

Un programa de mantenimiento rutinario se determina en gran parte por la experiencia; este factor "de experiencia" depende principalmente del ciclo de trabajo de la instalación.

Un programa general de mantenimiento de una máquina se bosqueja como sigue:

- a) Limpieza de los filtros de aire, aceite y combustible
- b) Verificación de la exactitud de los medidores de temperatura de entrada a la turbina
- c) Verificación eléctrica de los componentes del control electrónico
- d) Prueba de los tapones encendedores
- e) Limpieza de los álabes del compresor con tratamiento de cáscara de nuez
- f) Verificación de la presencia o ausencia de vibración de la máquina con los instrumentos apropiados, si un examen preliminar señala cualquier indicio de vibración excesiva
- g) Prueba del flujo de las boquillas de combustible, para aseguramiento de la velocidad de flujo apropiada.

#### **Reparación general.**

Los aspectos únicos en la reparación general de las turbinas de gas incluyen operaciones tales como:

- a) Balanceo de precisión de los rotores de alta velocidad
- b) Inspección para localizar grietas en todas las partes sujetas

- a grandes esfuerzos, como los álabes y discos del compresor y la turbina, ejes de la máquina, engranes, uniones o juntas de soldadura, armaduras de láminas metálicas, etc. Se pueden examinar las partes magnéticas por inspección de partículas magnéticas. Las turbinas tienen muchos materiales de acero inoxidable no magnético para alta temperatura y se examinan por inspección penetrante fluorescente con luz ultravioleta.
- c) La mayoría de las turbinas contienen sellos de laberinto de gran diámetro que pueden examinarse para ver si hay roce excesivo. Se deben eliminar las rebabas que se hayan levantado con el roce ligero normal.
- d) Una verificación completa del equipo electrónico generalmente usado en los sistemas de control de combustible es importante para garantizar el control correcto de la temperatura de entrada a la turbina.

#### **Cambio de unidades y su reparación**

Las piezas que resultan dañadas durante la operación de la turbina deben ser reemplazadas por otras. Actualmente, muchas de las piezas dañadas se analizan y se determina si es posible y conveniente (económica y técnicamente) su reparación. Se han desarrollado sofisticadas técnicas que permiten tales reparaciones con un alto grado de confiabilidad y exactitud.

Los programas de mantenimiento deben incluir programas para

el reemplazo de las piezas buscando prevenir fallas de las mismas, y en consecuencia, de la máquina completa.

Los álabes de la turbina, tanto fijos como móviles, son las partes componentes que representan una mayor cantidad de trabajo de mantenimiento en una base rutinaria.

Estas piezas se encuentran sometidas a severas condiciones de carga y temperatura y de ellas depende, en alto grado, la disponibilidad de la turbina.

#### **Costos**

Los costos de todas las actividades de mantenimiento mencionadas, forman parte de los costos de operación de una turbina de gas. Se estima que las salidas anuales por concepto de mantenimiento rutinario, por ejemplo, suelen promediar del 10 al 20% del precio inicial de compra de la turbina. (este dato es una estimación hecha por la American Gas Association)

Los factores que integran estos costos son, principalmente,

- 1) mano de obra : incluyendo en este punto, la necesaria para realizar en forma directa las operaciones de mantenimiento, y la mano de obra que queda ociosa si la turbina se encuentra fuera de servicio. Estos últimos costos, obviamente, se encuentran en relación directa al tiempo de inactividad de la máquina.
- 2) refacciones : incluyendo en este punto la compra o rehabilitación de piezas componentes dañadas y el sostenimiento de un

inventario de tales piezas

- 3) el empleo de equipo de medición y control sofisticado, sea propio o rentado.
- 4) paralización de la producción, esto es, los costos que resultan de no contar con la energía proporcionada por la turbina.

La reducción de todos y cada uno de estos costos es siempre un objetivo de los usuarios.

La crítica situación económica que se sufre en la actualidad, ha obligado a la drástica reducción del presupuesto para la compra de turbomaquinaria térmica y exige, además, una disminución en los costos de operación de las unidades instaladas.

Esto plantea la necesidad, por parte de los usuarios de tales máquinas, de prolongar la vida útil de los equipos existentes asegurando su buen funcionamiento al menor costo posible. Ello es posible mediante la optimización del mantenimiento de dicho equipo y de las técnicas de reparación de los mismos.

Mucho del esfuerzo de investigación de los fabricantes internacionales de turbinas se está dirigiendo a la obtención de una vida útil más prolongada de sus productos atendiendo a esta necesidad de sus clientes.

Por ejemplo, los programas de mantenimiento de una turbina de gas, que incluyen inspecciones periódicas y el reemplazo de

las piezas sometidas a condiciones más severas, se han establecido en una base de intervalos específicos determinados por las horas de operación de la unidad. Estos intervalos, a su vez, y como ya se ha destacado, responden a la experiencia de los fabricantes en relación a la vida útil de las diferentes partes (en función del material y exigencias operativas, etc.) y a la de la turbina como un todo.

A pesar de que esta práctica continúa, la tendencia próxima futura será la de hacer el mantenimiento en una base "cuando se necesite" y "donde se necesite" de acuerdo al comportamiento de la unidad determinado por la medición de parámetros estratégicos. Esto implica el desarrollo de sofisticados dispositivos de instrumentación, sobre los que trabajan los fabricantes más importantes de turbinas.

La razón del cambio de filosofía obedece principalmente, como ya se ha comentado, a la búsqueda por reducir costos y a que cada unidad trabaja en condiciones únicas, lo que resulta en diferencias en la resistencia de sus partes.

El objetivo de los programas de mantenimiento, en cualquier caso, es obtener la máxima "disponibilidad" de la turbina, entendiendo como disponibilidad la siguiente relación:

$$\text{Disponibilidad} = (A + B) / (A + B + C1 + C2)$$

donde, A = horas de funcionamiento; B = horas en las que la turbina está disponible pero no es usada; C1 = horas en las que la turbina no está disponible por inspecciones o necesidades programadas de mantenimiento; C2 = horas en las que la turbina no está disponible por fallas mecánicas

### 13. Alabes

#### 13.1. Descripción

La confiabilidad de una turbina de gas está determinada, en gran medida, por la confiabilidad de sus álabes; la falla de cualquiera de ellos puede arruinar la máquina, lo que ocasionaría muchos problemas y gastos.

A continuación se presenta una pequeña "semblanza" de los álabes de una turbina de gas, tema del actual trabajo.

El álabe móvil en una turbina de gas es el componente a través del cual la energía cinética de un chorro de gas caliente es convertida en energía mecánica útil mediante la rotación de la combinación álabe\_disco\_flecha.

Estas partes giran a velocidades muy elevadas en la trayectoria del gas; por tanto, en operación de la turbina son sometidas a una multitud de fuerzas, tales como la centrífuga, la torsional, la de flexión, la tangencial y a la vibración axial, o a la combinación de algunas de estas fuerzas.

Pero no sólomente se encuentran sometidos a esta severa carga mecánica, también lo están a elevadas temperaturas y a elevados niveles de contaminación, sobre todo en las primeras etapas.

El diseño y construcción de los álabes son actividades complejas, de hecho, han planteado tantos retos a los tecnólogos, que constituyen un importante logro; lo mismo puede mencionarse de los materiales empleados en su manufactura y en los procesos observados en su fabricación, como ya se ha mencionado en ocasiones anteriores y se destaca aún más en este mismo capítulo.

Los álabes fijos, o toberas, de una turbina de gas, por su parte, tienen la importante función de la orientación del flujo de gas caliente y de su distribución.

Al operar la turbina, estas piezas están sometidas a una carga mecánica menor en comparación con los álabes móviles, que deben resistir elevadas fuerzas centrífugas. Sin embargo, sobre todo los pertenecientes a las primeras etapas, son las partes del motor que deben soportar las temperaturas más elevadas.

Los álabes fijos tienen una geometría muy compleja, lo que establece exigencias importantes en su construcción.

Los álabes directores están sometidos a elevadas dilataciones térmicas por lo que, al ser colocados en su posición, debe estimarse un huelgo radial, con respecto a la carcasa, relativamente grande.

Como consecuencia de las diferencias de longitud entre el estado frío y el caliente, los álabes directores, en forma general, se fijan únicamente por un lado a la carcasa (por ejemplo, a la pared externa); mientras que por el otro extremo, se asientan en

forma móvil sobre un anillo interno de la carcasa denominado diafragma.

El álabe móvil de una turbina de gas y su base de unión (raíz), deben ser lo suficientemente fuertes y rígidos para sostenerlo el mayor tiempo posible en su lugar sobre la circunferencia del rotor, cuando actúan sobre él:

#### Fuerza centrífuga

Esta fuerza es radial, está directamente relacionada con la velocidad de rotación del álabe y con la masa del mismo. Actúa en la solución de continuidad entre la hoja del álabe y la raíz del mismo. Se manifiesta en forma de esfuerzos de tracción y de torsión, como se explica a continuación:

Llamando  $m_B$  a la masa en kilogramos de la hoja del álabe y  $r_B$  a la distancia en metros desde el eje de rotación hasta el centro de rotación del álabe, y  $C$  a la fuerza de gravedad, entonces se tendrá la siguiente expresión para el esfuerzo de tracción en  $\text{kg/cm}^2$

$$\sigma_1 = \frac{C}{A_B} = \frac{m_B \cdot r_B \cdot \omega^2}{g A_B} \quad \dots (13.1)$$

donde,  $A_B$  es la sección transversal de la base de la hoja del álabe en  $\text{cm}^2$

$\omega$ , es la velocidad de rotación en rad/seg;

$g$ , es la aceleración de la gravedad (estimada, en promedio, en 9.81 m/seg<sup>2</sup>)

La producción de los esfuerzos de torsión  $\tau_t$  exige una aclaración previa. Según la figura 13.1, la fuerza centrífuga parcial  $\Delta C$  de una masa elemental  $\Delta m$ , situada fuera del eje de gravedad  $Z$  de la hoja del álabe, posee una componente  $\Delta T$  en dirección periférica, que actúa torsionando, produciendo un momento  $\Delta M = \Delta T \cdot x$

La suma de todos estos momentos parciales  $\Delta M$  no es, en general, nula, de tal manera que se produce un momento resultante de torsión. Con  $I_{xy} = \int dA \cdot x \cdot y$  como momento centrífugo<sup>1/</sup> en cm<sup>4</sup> y  $\rho$  como la densidad del material de los álabes en g/cm<sup>3</sup>, se obtiene el momento de torsión resultante en kg cm, sobre toda la hoja del álabe, de longitud  $Z$ , expresada en cm

$$M_t = \frac{\rho \omega^2}{g \times 10^5} \int I_{xy} \cdot dz \quad \dots (13.2)$$

La determinación numérica se hace menor gráficamente, ya que es difícil expresar matemáticamente la forma del álabe.

Este momento de torsión está dirigido, siempre de tal manera

---

<sup>1/</sup>  $I_{xy}$  es el denominado producto de inercia, se define como el momento común a dos ejes perpendiculares (en este caso X y Y)

que el ángulo  $\alpha$  (véase figura 13.1) disminuye. Para un cálculo aproximado puede despreciarse generalmente el esfuerzo de torsión de los álabes.

La raíz del álabe debe ser diseñada, en consecuencia, para soportar la carga centrífuga del álabe (superior a las 2 o 3 toneladas en términos generales) y mantener el álabe adecuadamente alineado (balanceado). La fuerza centrífuga ocasiona vibración en los álabes y se incrementa enormemente si no hay un adecuado balance del rotor.

#### **Fuerza de impulso del fluido**

Esta fuerza es tangencial; opera cerca de la altura media del álabe produciendo esfuerzos de flexión.

Puede considerarse la hoja del álabe como una viga libre empotrada en el contorno exterior del anillo. La magnitud y situación de la fuerza de flexión resultante puede calcularse exactamente, conociendo el desarrollo de las presiones, sobre ambos lados del álabe. De una manera aproximada, puede suponerse al álabe sometido a un esfuerzo de tracción producido por la diferencia de presiones  $\Delta P$  antes y después de la etapa de marcha. Por un "truco constructivo" puede evitarse, al menos parcialmente, el esfuerzo de flexión en la raíz del álabe, en la medida que lo permita el huelgo existente entre la raíz y el anillo (véase esta consideración

en los comentarios sobre los diversos medios de sujeción de álabes). Se inclina el eje del álabe, según la figura 13.2, un poco respecto a la dirección radial, de tal manera que la fuerza centrífuga ejerza un momento flector contrario. Con ello, la sollicitación principal sobre los álabes sigue siendo la del esfuerzo de tracción en la raíz, producida por la fuerza centrífuga de acuerdo con la ecuación (13.1); haciéndose disminuir progresivamente la sección transversal de dicho álabe, desde el pie hacia la cabeza, con objeto de que aquella tensión vaya siendo menor (por disminución de la masa).

Es interesante comentar que los impactos del gas ocasionan, además, vibración de los álabes.

#### **Fuerza tangencial "retardada"**

Esta fuerza es ocasional; es causada por la desaceleración repentina debida a variaciones en la carga del motor.

#### **Fuerzas vibratorias**

Estas fuerzas son debidas a la amplificación de vibración tangencial o axial debida a la resonancia.

Hay que distinguir entre las vibraciones de flexión (como en una viga libremente apoyada por un extremo) y las vibraciones de torsión producidas por las oscilaciones periódicas del momento torsor según la ecuación (13.2). Es necesario evitar las resonan-

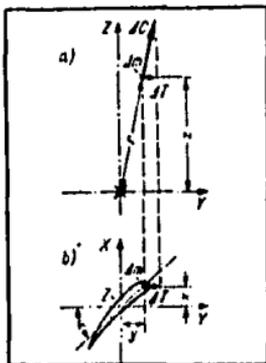


Fig. 13.1. Esquema para la determinación del momento de torsión en un álabe: a, vista en dirección del eje de giro X; b, vista en dirección del eje de gravedad del álabe Z

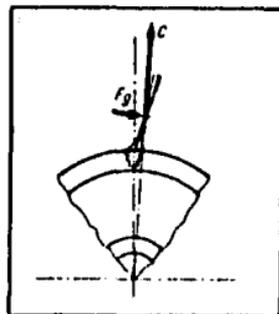


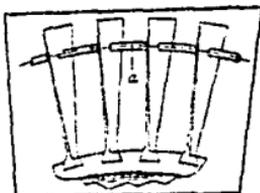
Fig. 13.2. Inclínación del álabe para compensar el momento de flexión de las fuerzas de los gases  $F$  por un momento de flexión opuesto de la fuerza centrífuga  $C$

cias entre la frecuencia propia y de excitación, ya que dichas resonancias pueden conducir a la rotura de los álabes.

La excitación es, especialmente, la frecuencia en la periferia  $f = n/60$  del rotor y su producto por el número de álabes conductores  $z$ . Este último número divide a la corriente total en  $z$  corrientes parciales que inciden sucesivamente contra todos los álabes. Igualmente, los múltiplos enteros de  $f$  pueden también actuar de excitación, especialmente el doble. Como orientación, puede decirse que la frecuencia propia más baja  $\omega$  del álabe, debe estar por encima del cuádruple de la frecuencia periférica  $f$ , es decir, que aproximadamente se tenga  $\omega \geq 4f$ . Naturalmente, quedan aún un gran número de posibilidades de resonancia, pero generalmente no son peligrosas.

La verdadera dificultad en el cálculo de las oscilaciones de los álabes radica en la determinación de sus frecuencias propias, que dependen, entre otras causas, del material de fabricación, de la forma de fijación del pie o raíz del álabe, de la tensión  $\sigma_z$ , de la fuerza centrífuga y de la temperatura de trabajo, que influye el módulo de elasticidad. Existen algunos métodos aproximados de cálculo, generalmente empíricos. Pero lo más conveniente parece ser la determinación experimental de las frecuencias propias mediante experiencias con piezas, ya que la construcción de modelos de álabes es relativamente barata.

Para mejorar la capacidad de amortiguamiento de los álabes y así evitar problemas de vibraciones, se acostumbra, sobre todo en álabes largos, enlazar entre sí varios álabes (formando grupos) o incluso todos los álabes de una hilera del rotor, por medio de los denominados alambres de unión (véase la figura 13.3) o bien con bandas cubridor<sup>1/</sup>. Esto hace subir, naturalmente, el esfuerzo de tracción en la raíz del álabes.



a. alambre de unión

Figura 13.3.

Además, el álabes no debe ser sujeto a corrosión o erosión, y debe ser capaz de ser manufacturado exactamente y en forma económica, y de ser ensamblado en los canales del rotor seguramente.

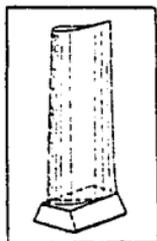
Los álabes son unidos al rotor por uno de los siguientes métodos:

---

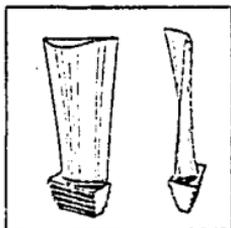
<sup>1/</sup> Estas bandas, ilustradas al ejemplificar la refrigeración de los componentes de una turbina en una sección precedente, también se emplean para disminuir las pérdidas de chorro "por volteo" en los extremos de los álabes.

- 1) Maquinados en una pieza con el disco o anillo del rotor. Este método es muy costoso, se justifica sólo en casos especiales cuando los álabes son sujetos a velocidades muy elevadas y a altas temperaturas.
- 2) Soldados al disco del rotor. Este método tiene algunas ventajas, pero resulta muy insatisfactorio para proporcionar mantenimiento.
- 3) Insertados radialmente en una ranura circunferencial (ranura en el disco del rotor), y fijados por :
  - a) base a cola de milano
  - b) base con forma de T, simple o múltiple (esta última base también es denominada "de pirámide escalonada" o "de abeto")
- 4) Enganchados sobre costillas circunferenciales en los dos lados de la periferia del disco del rotor, llamado montaje a horcajadas
- 5) Insertados radialmente en ranuras rectas y planas en la periferia del disco y sostenidos por uno o más clavillos colocados axialmente a través del disco y de la raíz del álabe.
- 6) Insertados axialmente en ranuras espaciadas uniformemente alrededor de la periferia del disco, llamada base de entrada axial.

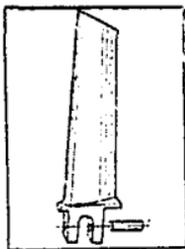
Algunas de estas formas de fijación de los álabes se ilustran en la figura 13.4



Base "a cola de milano"



Base "de pirámide escalonada o de abeto"



Unión con pasador

Figura 13.4.

En relación a estas formas de sujeción de álabes, se puede comentar, brevemente, lo siguiente:

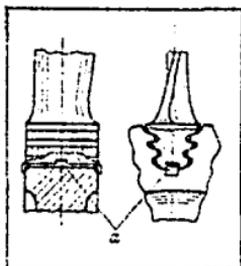
La forma cola de milano ha sido reemplazada, en gran medida, porque representa pérdidas cuando la turbina se sujeta a repetidos calentamientos y enfriamientos.

La base con forma de T sostiene la fuerza centrífuga por una presión normal sobre el área de las salientes de contacto.

El propósito de la base con forma T múltiple es ganar superficie de contacto adicional sin debilitar indebidamente ni la raíz del álabe ni los anillos de las ruedas con cortes profundos. La fractura de la raíz del rotor en cualquier cuello, es soportada por la resistencia del metal en el cuello, unida a la compresión ejercida sobre las salientes de contacto a mayor radio. Con un diseño correcto, la resistencia total a la fractura será la misma en todas las salientes; por tanto, la resistencia iguala a aquélla tenida por la saliente de máxima anchura al radio máximo. Todas las salientes deben ser maquinadas a la curvatura de la ranura del anillo donde serán colocadas.

La raíz del álabe se asienta en el anillo exterior: (o corona) del disco con un cierto huelgo, pequeño pero apreciable. Únicamente durante el trabajo (por las fuerzas centrífugas y elevadas

temperaturas), los álabes quedan firmemente asentados. Como seguro contra desplazamientos axiales de los álabes se colocan, generalmente, unas tiras de chapa con saliente (véase la figura 13.5) curvadas sobre la corona del disco.



a = frenos de seguridad

Figura 13.5.

### 13.2. Diseño y Construcción de los Alabes

Uno de los problemas de mecánica de fluidos a que se enfrenta el diseñador de una turbina de gas (haciendo referencia tanto a la turbina como al compresor), es el determinar la forma del álabe que producirá la máxima eficiencia conmensurable con el trabajo requerido con la conformación del pasaje entre dichos álabes.

Este trabajo de diseño, en los casos supersónicos y subsóni-

cos, es una operación muy compleja dada la complicada naturaleza del flujo a través de pasajes tridimensionales.

En los modelos iniciales de turbinas de gas, el diseño era muy empírico: se construían álabes de diversos perfiles y materiales, éstos eran montados en turbinas que posteriormente se ponían en funcionamiento; se observaba el comportamiento del motor y se evaluaba así el desenvolvimiento de un determinado álabe. Este método, a pesar de brindar resultados, no permitía el desarrollo "científico", ya que no pretendía el establecer las causas de los diferentes comportamientos a fin de, a partir de la teoría, proponer nuevos diseños.

Actualmente, el diseño de álabes es técnico\_aerodinámico, y alcanza niveles muy sofisticados. El proceso puede resumirse, de forma muy esquemática, de la siguiente manera:

- 1) A partir de los parámetros globales, tales como la razón de presión, la velocidad de la flecha, propiedades termodinámicas como la temperatura y presión totales, número de etapas, etc.; se determina la geometría del vector velocidad necesario para escoger los álabes. Para esta operación se dispone de diversas técnicas computacionales, que incluyen los principios básicos de la mecánica de fluidos.

- 2) Se proponen, a partir de los resultados de la operación anterior, varias formas de álabes que son evaluadas, empleando la computadora y, posteriormente, resultados provenientes de pruebas experimentales con modelos, para así poder determinar aquella forma que represente las menores pérdidas.

Se pueden verificar varias secuencia de cálculos variando algunos parámetros para refinar la selección y realizar cambios necesarios (giros, inclinaciones, etc.).

Este proceso de diseño "por análisis", como es conocido, es necesario cuando se tienen diversas limitaciones mecánicas y se desea introducir algunos efectos viscosos, u otros, difíciles de evaluar exactamente.

Las limitaciones mecánicas se refieren a que el área de la sección transversal, espesor y geometría del extremo de entrada del gas, son controladas también por golpes, vibraciones y otros esfuerzos, y no simplemente por consideraciones aerodinámicas.

Para destacar la dificultad para evaluar, por ejemplo, las pérdidas en el flujo por fricción, y justificar el comentario realizado, se puede comentar lo siguiente:

Los parámetros que, se sabe por experiencia, tienen un efecto sobre el valor de las pérdidas por fricción son:

- 1) La forma y las dimensiones del canal del álabe; esto es, la longitud, anchura y espesor del chorro de gas, su curvatura

y su divergencia

- 2) La condición del gas; esto es, presión, densidad, temperatura y velocidad

Por ejemplo:

En canales medianamente anchos, debe tenerse en cuenta la compresión y la re\_expansión en el lado cóncavo del álabe y los efectos de los flujos secundarios (producidos por el efecto de fricción contra las superficies laterales del canal) y que incrementan la turbulencia (ó pérdidas por choque) y, con ello, las pérdidas por fricción.

Si la curvatura del álabe es muy pronunciada, se producirá una diferencia de velocidades entre el lado interno y el externo tan elevada, que se producirán "eddies" muy violentos en la masa entera del chorro, con una pérdida correspondiente de energía cinética. La curvatura del álabe debe ser, pues, adaptada a la velocidad del fluido.

De acuerdo con lo anterior, las pérdidas por fricción pueden ser divididas en:

- 1) Resistencia del borde, correspondiente a la formación de "eddies" en el borde durante la afluencia
- 2) Resistencia friccional, entendiéndose por ello el trabajo hecho

- por las fuerzas de fricción a lo largo de las paredes del canal
- 3) Resistencia de curvatura, dependiente únicamente del cambio en la dirección del chorro de gas.

La evaluación de estas resistencias no puede ser hecha por fórmula, requiere de resultados experimentales (como ya se ha comentado).

Se puede obtener una estimación general al comparar la energía cinética en la salida del álabe, con la que debería tener con la misma caída de presión y un cambio de condición sin pérdidas y adiabático en el álabe. La diferencia en la "energía perdida". En la práctica se adoptan algunos coeficientes obtenidos en forma experimental por diversos fabricantes y diseñadores. También se dispone de algunas sofisticadas técnicas computacionales para la evaluación de tales pérdidas.

A continuación se mencionan algunas conclusiones referentes a la construcción de los álabes de una turbina de gas.

- 1) La forma del álabe varía considerablemente dependiendo de los objetivos del diseñador para la sección del canal por la que pasa el fluido.
- 2) Los álabes de impulso rara vez son hechos de esta manera, se ha encontrado que una ligera estrangulación del pasaje de salida para crear alguna reacción puede mejorar el comportamiento de

los mismos.

- 3) Los álabes de impulso son relativamente profundos en la sección central desde el frente hasta la parte posterior del álabe. Una construcción comúnmente empleada en los primeros modelos, era la formación de las secciones del frente y de la parte posterior en forma de arcos circulares, siendo la cara interna del álabe de mayor radio que la cara posterior. La forma es completada por el dibujo de líneas tangentes desde el círculo posterior, hacia la cara frontal.
- 4) Los álabes de reacción de los modelos "antiguos", comúnmente tenían un borde de entrada o ataque afilado. Sin embargo, este diseño ha sido sustituido por uno que proporciona al borde del álabe una nariz redondeada, la cual mejora la efectividad aerodinámica de la sección, y reduce las pérdidas por choque que existen cuando el ángulo de ataque del chorro se desvía del de las condiciones de diseño. Actualmente esta nariz causa una menor eficiencia a las condiciones exactas de diseño, pero el comportamiento general es mucho mejor.
- 5) La mayoría de los álabes son ahusados (esto es, van disminuyendo sus secciones) desde el centro hasta la punta. Esto reduce el peso de las porciones periféricas del álabe y consecuentemente, los esfuerzos en el centro que deben ser soportados bajo elevadas velocidades de rotación.
- 6) La línea central de la sección del álabe debe ser localizada sobre una línea radial para evitar los esfuerzos "de curvatura"

(bending stresses) en los álabes, excepto en los casos en que álabes son inclinados en la dirección del movimiento para permitir el momento centrífugo que compensa el momento de empuje del gas (véase explicación previa). En álabes largos, es usualmente necesario, además, torcer el álabe desde el centro hasta la punta para compensar las variaciones de velocidad del álabe y, en algunos casos, también para satisfacer las condiciones de equilibrio de la presión radial.

- 7) La vibración de los álabes, en algunos casos, ha sido la causa de falla, y es importante que la frecuencia natural del álabe sea tal, que esté fuera del rango de frecuencias de operación de la turbina y no coincida con velocidades armónicas. En algunos casos, grupos de álabes o el anillo completo de álabes, están, ya sea cubiertos o enlazados, juntos para formar una unidad rígida, menos sujeta a vibración.
- 8) Una planeación cuidadosa, basada en la experiencia, es requerida en el diseño de álabes para reducir la posibilidad de falla por fatiga.
- 9) El pasaje del flujo entre álabes adyacentes se fija por el contorno de los álabes, por la altura y por el grado de inclinación de los mismos. Cuando el grado de inclinación se reduce, se incrementa la superficie de fricción debido a que la superficie de roce crece. Por el otro lado, un incremento en el grado de inclinación, tiende a incrementar la magnitud de los flujos secundarios y puede, además, incrementar las pérdidas por resis-

tencia al avance en el borde de salida del álabe. Es imposible el establecimiento de reglas absolutas de cómo dar forma a la sección del pasaje. Grandes ángulos de giro por etapa dan, en general, menor eficiencia que los pequeños; sin embargo, si éstos son demasiado pequeños, resultan en un menor trabajo por etapa.

- 10) En relación con los álabes de reacción, el término "corrección de arco" (gagging correction) es empleado. Esto significa un ajuste del extremo de salida del álabe al torcer el mismo con una herramienta especialmente hecha para este propósito. Después de que los álabes son ensamblados en el rotor, con álabes hechos de materiales dúctiles, es posible el ajuste de cada álabe para tener un apropiado pasaje de flujo y una adecuada posición en la fila de álabes. Se define "gagging" como la razón del área neta para el flujo de gas, al total del área anular libre en el anillo de álabes. Para cambiar el "gagging" de 30 a 20 por ciento, por ejemplo, el diseñador puede torcer cada álabe hacia adentro, y hacia el siguiente álabe para así reducir el pasaje libre para el flujo de gas. De esta manera, es posible incrementar o reducir el "gagging" mediante la torsión de los álabes.

Todo el proceso de fabricación de álabes para turbinas de gas, involucra un alto grado de precisión, sofisticación y tecnología. Actualmente se emplean muchos métodos en la manufactura de

estas piezas. Estos se describen más adelante. Cabe comentar que los materiales especiales requeridos para la fabricación de los álabes y otras partes importantes de las turbinas de gas, han exigido el desarrollo de muchos métodos de manufactura.

La vida de los álabes varía desde unos pocos cientos a miles de horas, dependiendo del tipo de tarea que realiza el motor, y del rango de temperaturas empleado. Este factor es de suma importancia en la selección del material, como se detalla en el apartado correspondiente.

Se han propuesto y usado varios métodos de enfriamiento de álabes. Uno de los más exitosos consiste en hacer hueco el álabe y en pasar aire de enfriamiento hacia afuera a través de un canal dentro del álabe.

La corrosión y erosión de álabes ocurre bajo ciertas condiciones. Los mayores problemas de corrosión se presentan cuando se queman en la cámara de combustión aceites combustibles con alto contenido de vanadio. El borde de entrada de los álabes largos, es el más propenso a la erosión que cualquiera otra parte del álabe.

En la figura 13.6 se ilustran las formas de los álabes de reacción que se han utilizado, indicándose los cambios que han tenido lugar al paso de los años.

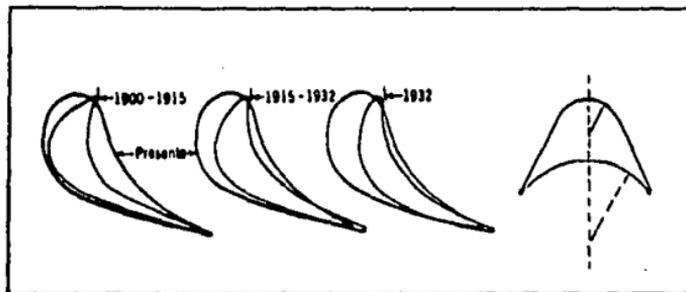


Figura 13.6. Formas de los álabes de reacción indicando los cambios que han tenido lugar

### 13.3. Defectos

Los defectos más comunes que se presentan en los álabes del rotor de una turbina de gas (sobre todo los de las primeras etapas que son sometidos a las condiciones más severas en términos de nivel de esfuerzo, temperaturas del metal y nivel contaminante) resultan de:

- 1) daños por impacto;
- 2) corrosión o ataque por sulfidación;
- 3) fracturas por fatiga termal;
- 4) fluencia debida a una exposición prolongada a temperatura y esfuerzos elevados.

El daño más frecuente que se presenta en los álabes fijos, particularmente en la primera y segunda etapa, es el daño térmico que puede consistir en:

- 1) corrosión;
- 2) distorsión resultante de las diferencias de conductividad térmica en el componente;
- 3) fracturas debidas a la fatiga por alta temperatura y ciclo corto como resultado de frecuentes paros y arranques; y
- 4) sobrecalentamiento, con el consecuente deterioro de la estructura del metal.

Como resultado de cualquiera, o de la combinación de estos

fenómenos, los álabes pueden dañarse después de algunas horas de operación (por ejemplo, los álabes fijos, en general, deben ser reemplazados y reparados después de 20 000 horas de operación.)

#### 13.4. Materiales

En el diseño de cualquier parte componente de una turbina de gas, la elección del material a emplear en su fabricación, es una etapa difícil y trascendental.

Es difícil porque involucra el considerar numerosos factores (propiedades, condiciones de servicio, proceso de manufactura, costos, etc.), muchas veces antagónicos, y entre los que debe encontrarse un equilibrio que optimice la elección<sup>1/</sup>.

Es trascendental, porque de ella depende, en gran medida, el éxito de la parte en el cumplimiento de la tarea encomendada.

En el caso de las turbinas de gas, el tema de los materiales adquiere una importancia tan determinante, que merece una atención especial.

---

<sup>1/</sup> Por ejemplo, el diseñador obviamente no siempre es libre para seguir lo dictado por las condiciones deseadas desde el punto de vista termodinámico y aerodinámico. Debe adoptar compromisos entre éstos y consideraciones de los materiales (composición, procesamiento de los mismos, limitaciones de los métodos de manufactura observado, etc.)

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, las extremas condiciones de temperatura y esfuerzo mecánico a que son sometidos muchos de los componentes de una turbina de gas (especialmente los álabes móviles), exigen el empleo de materiales especiales capaces de resistir tales condiciones, (el comportamiento de los materiales cambia según la temperatura a que sean expuestos como se detalla más adelante).

El desarrollo de las turbinas de gas ha ido, en consecuencia, en paralelo al de la tecnología de materiales resistentes a las altas temperaturas; lo ha estimulado en búsqueda de mayores eficiencias y potencias, y ha dependido de sus alcances para lograr los propios. Algo similar puede decirse de los procesos de manufactura, ya que los nuevos materiales han exigido, a su vez, el desarrollo de sofisticados procesos de formado.

A continuación se presentan algunas generalidades sobre los materiales resistentes a altas temperaturas que intervienen en la construcción de las diversas piezas componentes de una turbina de gas. Se incluyen consideraciones sobre el comportamiento de los materiales cuando son sometidos a la combinación de carga y elevada temperatura, y se mencionan algunos factores a considerar en la elección de los materiales de los álabes de una turbina de gas.

Pudiera parecer excesivo el material expuesto a este respecto, pero es, además de interesante, de suma importancia para destacar aún más la influencia de la turbina de gas en el desarrollo tecnológico en general. Esto porque los logros alcanzados son también utilizados en otros campos industriales donde se necesitan aleaciones capaces de mantener elevada resistencia a altas temperaturas, incluso en un ambiente corrosivo.

#### 13.4.1. Aleaciones para elevada temperatura

Generalmente, se entiende por aleaciones para elevada temperatura, aquellas que son capaces de prestar servicio (soportando cargas de cierta consideración) a temperaturas superiores a unos 500 °C. Sin embargo, es necesario hablar un poco más sobre el concepto "temperatura elevada".

Las propiedades de todos los materiales disminuyen, en mayor o menor grado, con incrementos, a partir de la ambiente, de la temperatura en que el material trabaja. Además, se presentan o cobran gran importancia, fenómenos como la fluencia, la oxidación y corrosión y otros.

Se puede pensar cómo si del lado del proceso de transformación de energía no existe un límite máximo de temperatura a utilizar, éste existe para los materiales estructurales. Tal límite se puede, en una primera aproximación, relacionar con la temperatura de fusión, temperatura a la cual se asiste al cambio de estado del

material de sólido a líquido. Sin embargo, este parámetro no es del todo significativo debido a que, como se explicará más adelante, uno de los fenómenos responsables de la pérdida de características mecánicas del material al incrementarse la temperatura de trabajo es la fluencia, relacionada a su vez, con temperatura, tiempo y esfuerzos a los cuales la estructura está expuesta. Para evidenciar lo anterior, en el cuadro 13.1 se da como orientación, la máxima temperatura a que pueden utilizarse distintos tipos de materiales y aleaciones, tomando como tal la máxima temperatura a la cual el material es capaz de resistir a un esfuerzo de  $7 \text{ kg/mm}^2$  durante 100 horas sin llegar a la rotura. En el mismo cuadro se indican las temperaturas de fusión y la relación porcentual  $\theta$  entre la temperatura máxima de "ejercicio" y la de fusión. Puede observarse cómo el menor valor de  $\theta$  corresponde a las aleaciones de titanio y los mayores valores corresponden al polvo de aluminio sinterizado y a las aleaciones de níquel y cobalto.

#### 13.4.2. Comportamiento de los materiales a elevadas temperaturas

Como ya se ha dicho, todas las propiedades de un material se ven más o menos modificadas con incrementos en la temperatura a que es expuesto. Conforme con esto, los factores que deben considerarse para caracterizar el comportamiento de los materiales destinados a prestar servicio sometidos a la acción simultánea de cargas

Cuadro 13.1.

Abrasion	Punto de fusión °C	Temperatura de abstracción °C	g %
Magnesio .....	650	345	67
Aluminio .....	650	345	67
Alumín sinterizado .....	650	485	82
Titanio .....	1040	650	48
Aceros martensíticos .....	1538	732	56
Aceros austeníticos .....	1538	870	63
Níquel .....	1450	1095	78
Cobalto .....	1495	1095	77
Molibdenu .....	2625	1495	60

y temperaturas, son de los tres tipos siguientes:

- 1) Fenómenos, que, o bien se presentan exclusivamente en la utilización de los materiales a temperaturas elevadas, o al menos es en estas condiciones cuando llegan a adquirir una importancia decisiva. Tales son la fluencia, los esfuerzos térmicos y la oxidación y corrosión.
- 2) Influencia de la temperatura en las propiedades mecánicas clásicas, es decir, en aquéllas que normalmente sirven para caracterizar el comportamiento de los materiales metálicos a temperaturas ambiente (estas propiedades, en esencia, pueden reducirse a las deducidas de los ensayos clásicos de tracción, dureza, choque y fatiga)
- 3) Propiedades físicas del material de las que dependen en parte algunas de las características incluidas en 1) y 2), como son, coeficientes de dilatación y conductividad térmica, calor específico, emisividad y módulo elástico, capacidad de amortiguamiento, etc.

Para determinar cada uno de estos factores deben verificarse diversas pruebas normalizadas, los resultados de tales ensayos se suelen presentar en forma de gráficas, indicando las condiciones en que se efectuaron. Estas curvas se utilizan en diseño. Para cada material se fabrican "curvas de diseño", que resumen sus propiedades como se ejemplifica en la figura 13.7.

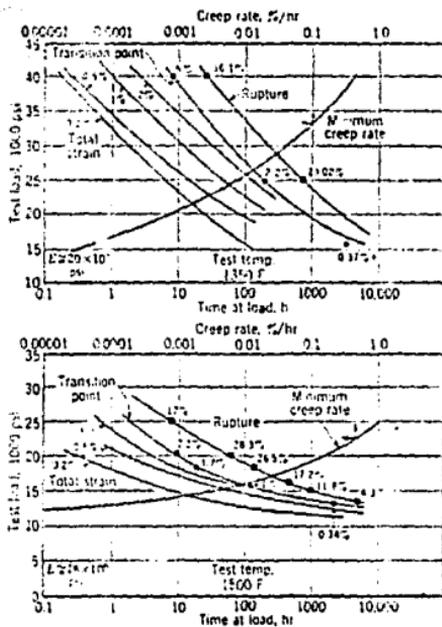


Fig. 13.7. Design curves for Refractalloy 70.

De los principales factores que caracterizan el comportamiento de los materiales a temperaturas elevadas, se puede comentar lo siguiente:

### Fluencia

El fenómeno del aumento constante de la deformación con el tiempo que se produce en todos los materiales cuando la temperatura es suficientemente elevada, recibe el nombre de fluencia (creep). La temperatura a la que este fenómeno cobra importancia es diferente para cada material y, de ello, depende su resistencia para trabajar a temperaturas elevadas.

En la figura 13.8 se representa la forma típica de una curva de fluencia, es decir, la variación de la deformación con el tiempo que experimenta una probeta sometida a una carga y temperatura constantes. En ella es posible distinguir varias etapas:

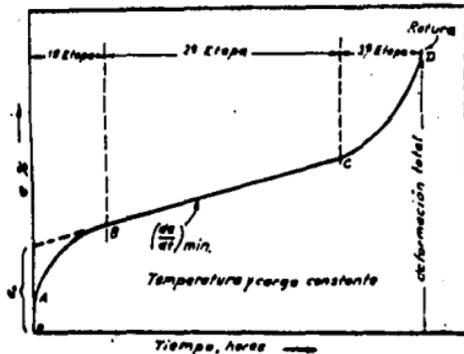


Figura 13.8. Curva típica de fluencia

- 1) Una deformación prácticamente instantánea OA, parte elástica y parte plástica<sup>1/</sup> o solamente elástica, según se haya rebasado o no el límite elástico del material.
- 2) Una primera etapa AB en que la velocidad de deformación va disminuyendo con el tiempo.
- 3) Una segunda etapa en que la velocidad de fluencia permanece constante. Esta velocidad de fluencia es, precisamente, la mínima que se encuentra a lo largo de toda la curva.
- 4) Una tercera etapa en que la velocidad de fluencia aumenta rápidamente, hasta que finalmente se produce la rotura. Si en vez de mantener constante la carga aplicada, se varía ésta a medida que disminuye la sección, de forma que sean constantes los esfuerzos, esta tercera etapa de la fluencia puede en algunos casos no manifestarse y llegarse a la rotura sin que se aprecie aumento en la velocidad de fluencia.

Si a una misma temperatura se realizan ensayos con distintas cargas, se obtiene una familia de curvas, correspondiendo a cargas mayores, velocidades de fluencia también mayores. Igualmente, si los ensayos se realizan a distintas temperaturas conservando siempre

---

<sup>1/</sup> Cuando los materiales se someten a una determinada carga, experimentan una deformación que depende de la carga aplicada. Tal deformación puede desaparecer parcial o totalmente, o no desaparecer cuando la carga es retirada. Se conoce como deformación elástica a la que desaparece, y plástica a la que permanece. El límite entre éstas es característico del material y se denomina "elástico".

la misma carga, se obtiene otra familia de curvas, en que las velocidades de fluencia aumentan al hacerlo la temperatura.

Las características de fluencia que, en general, interesan más al ingeniero, son: la deformación en un tiempo dado y el tiempo al cabo del cual se produce la rotura. Se puede apreciar que, en ambos casos, interviene el tiempo, nuevo parámetro que usualmente no se tiene en cuenta en estructuras destinadas a trabajar a temperatura ambiente.

Para la determinación de las características mencionadas se emplean ensayos de deformación y rotura por fluencia. Estos, en esencia, consisten en someter una probeta a una carga y temperatura constantes durante todo el ensayo, y medir la variación del alargamiento con el tiempo (ensayo de deformación por fluencia), o bien, simplemente, el tiempo que tarda en producirse la rotura (ensayo de fluencia\_rotura). La carga aplicada es generalmente de tracción, aunque, también se determinan otras veces las características de fluencia a compresión, torsión, etc. Por la magnitud del tiempo empleado en los ensayos de fluencia, éstos pueden clasificarse en :

- 1) ensayos de muy corta duración (de pocos segundos a 2 o 3 horas),
  - 2) ensayos de duración corta o intermedia (de pocas horas a 10 mil horas),
  - 3) ensayos de larga duración (de 10 mil a 100 mil horas),
- siendo más apropiado uno u otro tipo, según la vida de servicio

que se prevea para la pieza a fabricar con el material ensayado.

Los datos obtenidos en estos ensayos permiten la construcción de la curva deformación tiempo; en ésta se debe indicar la duración del ensayo y la temperatura y carga empleadas.

La sensibilidad a la entalla es otra característica importante que puede deducirse de los ensayos de rotura por fluencia y que sirve tanto como ayuda en la selección de aleaciones, como para determinar el tratamiento térmico más conveniente cuando se prevean concentraciones de esfuerzos. El efecto de entalla es muy distinto para las diferentes aleaciones, variando también ampliamente en función de los esfuerzos nominales (carga dividida por sección mínima) y de la temperatura del ensayo. Según que la entalla aumente o disminuya el tiempo de rotura, se dice que la aleación es insensible o sensible a la entalla en las condiciones del ensayo (esfuerzo, temperatura, geometría de la entalla).

Otro fenómeno, consecuencia de la deformación por fluencia pero que adopta distinta forma, es la relajación que se manifiesta cuando en una pieza, cargada inicialmente de modo que adquiera una deformación determinada, se va variando la carga de tal manera que la deformación permanezca constante.

La relajación juega un papel muy importante cuando en una sección existen gradientes de tensiones, gradientes que tienden a desaparecer si el material se relaja con facilidad, en este caso,

puede tomarse, para los cálculos del proyecto, el esfuerzo medio. En cambio, si el material tiene gran resistencia a la relajación, es preciso hacer el cálculo basándose en el esfuerzo máximo.

El comportamiento de los materiales a elevadas temperaturas se ve influido por numerosos factores como son:

- 1) La atmósfera. en contacto con la pieza (la capa de óxido que se forma al entrar en contacto la superficie del metal con el oxígeno y otros elementos presentes en la atmósfera puede aumentar el tiempo de rotura por fluencia).
- 2) El tamaño del grano y la estructura cristalina.
- 3) El proceso de formado del material.

#### **Esfuerzos térmicos**

Cuando un material está sometido a gradientes de temperatura, las distintas partes del mismo tienden a dilatarse en diferente proporción de acuerdo con sus temperaturas y coeficiente de dilatación. El mismo efecto se produce, haya o no gradientes de temperatura, cuando la pieza está formada por dos o más materiales de distinto coeficiente de dilatación. Para que el cuerpo siga formando un todo continuo, es necesario que la deformación de cada zona se acomode a la de las contiguas, lo cual da lugar al desarrollo de un sistema de tensiones térmicas que depende de la forma del cuerpo y de la distribución de temperaturas. Si el material no es capaz de resistir estas tensiones y deformaciones, se produce la rotura.

Aunque a todos los esfuerzos que tienen su origen en una distribución heterogénea de temperaturas les conviene el nombre de esfuerzos térmicos, generalmente se reserva este apelativo a los que son producidos por un gradiente de temperaturas estable con el tiempo y que da lugar casi siempre a esfuerzos mucho más elevados, con lo cual puede darse el caso de que algunos materiales lleguen a fallar por heterogeneidades de temperatura que, si se aplicasen lentamente, podrían ser resistidas.

Cuando la rotura se produce por la aplicación de varios ciclos de choque térmico similares, el proceso se conoce por algunos como fatiga térmica. En este caso, el mecanismo que conduce al fallo del material es extremadamente complicado. Para evaluarlo se suelen verificar ensayos (realizados en condiciones lo más similares posibles a las de trabajo); los datos de los mismos se presentan, usualmente, en forma del número de ciclos que el material puede resistir bajo unas condiciones determinadas.

La experiencia indica que, en general, las siguientes condiciones conducirán a un aumento de la resistencia al choque térmico:

- 1) disminución del coeficiente de transmisión del calor entre el medio y la superficie de la pieza (posible mediante recubrimientos);
- 2) disminución del espesor de la pieza;
- 3) menor coeficiente de dilatación;

- 4) mayor relación, carga de rotura\_módulo elástico;
- 5) mayor ductilidad;
- 6) mayor conductividad térmica del material.

#### Oxidación y corrosión

El comportamiento de los metales y aleaciones en contacto con el aire y elevada temperatura, puede resumirse del siguiente modo:

Quando el oxígeno entra en contacto con una superficie metálica limpia, se forma una delgada película de óxido. El curso posterior del proceso depende de la naturaleza del óxido y del metal. Si el óxido ocupa un volumen menor que el metal al que va reemplazando, la película será porosa y seguirá permitiendo fácil acceso del oxígeno a la superficie del metal. En este caso, la relación de la oxidación con el tiempo será lineal. Este tipo de oxidación se presenta en metales como el calcio y el litio.

En el caso de que el óxido tenga un volumen específico igual o ligeramente mayor que el metal, la película no será porosa y para que siga formándose óxido es necesario un proceso de difusión a través de la misma, que se realiza por los iones del metal y del oxígeno. La velocidad de esta difusión es inversamente proporcional al espesor de la capa de óxido. En este caso, la relación de la oxidación con el tiempo es parabólica. Este tipo de oxidación se presenta en metales, como el hierro, el cobalto y el níquel.

Quando el volumen específico del óxido es considerablemente

mayor que el del metal, se producen tensiones entre el metal y el óxido que pueden dar lugar a un descascarillamiento de la película de óxido, con lo que el metal quedaría nuevamente en contacto directo con el oxígeno. En este caso, la relación oxidación\_tiempo es asintótica.

Los procesos descritos se ven estimulados por incrementos en la temperatura. Se suelen disminuir los efectos de la oxidación con recubrimientos superficiales y con elementos de aleación.

Aparte de la acción del oxígeno, las atmósferas en contacto con las piezas sometidas a temperatura elevada, contienen frecuentemente productos cuya acción corrosiva debe ser considerada. Entre estos productos pueden mencionarse el vanadio y el azufre.

La corrosión denominada intergranular, y que se presenta al registrarse la precipitación de carburos en los límites de grano de la microestructura del metal, es muy peligrosa porque representa la destrucción del material y la pronta inutilización de la pieza.

#### **Resistencia a la tracción y límite elástico**

Estas propiedades mecánicas de los materiales varían con la temperatura. En general, ambas van disminuyendo a medida que la temperatura se eleva; primero lentamente, después sufren una caída rápida y posteriormente tienden a estabilizarse en un cierto nivel, para al último, propender más o menos asintóticamente, a cero.

### Fatiga

Mientras a temperatura ambiente muchos materiales presentan un límite de fatiga (solicitaciones cíclicas que aumentan o disminuyen periódicamente) definido, en condiciones de elevada temperatura se llega siempre a la rotura para un número de ciclos suficientemente elevado, por baja que sea la carga.

Por otra parte, la frecuencia de aplicación de la carga tiene gran importancia, resistiendo los materiales mayor número de ciclos cuanto mayor es esta frecuencia; de acuerdo a ello, el tiempo que dura un material hasta la rotura, cuando está sometido a esfuerzos alternativos, está tan relacionado con las características de rotura por fluencia, como con el número de ciclos desarrollados durante ese tiempo; es por esto que se acostumbra señalar en las curvas de fatiga a temperatura elevada, además del número de ciclos a que la rotura se ha producido, el tiempo transcurrido hasta ese momento.

Es difícil dar una ley general sobre la influencia de los esfuerzos alternativos en el comportamiento de los materiales sometidos al calor porque se han obtenido resultados experimentales muy diversos; sin embargo, parece que : si la temperatura es elevada y la fluencia rápida, los fenómenos de fatiga son poco importantes y el tiempo de rotura del material, sometido al conjunto de la carga estática y alternativa, difiere poco del que le correspondería en el caso de que estuviese aplicada únicamente la carga está-

tica. A temperaturas inferiores, la fatiga debida a los esfuerzos alternativos, puede reducir notablemente el tiempo de rotura.

Otra propiedad interesante de los materiales, en relación con su comportamiento ante la acción de esfuerzos alternados, es su capacidad de amortiguamiento, es decir, la capacidad del material para resistir la acción de una fuerza excitadora exterior actuando en condiciones de resonancia. Cuando estas condiciones de resonancia se producen, el efecto es que los esfuerzos a que el material está sometido son los que corresponderían a la fuerza excitadora aplicada estáticamente, multiplicados por un factor de amplificación que, a su vez, depende de la capacidad de amortiguamiento del material, de la geometría de la pieza y de la fuerza aplicada.

#### 13.4.3. Aleaciones resistentes al calor y sus propiedades

Una vez conocidas las principales características del comportamiento de los materiales sometidos a la acción conjunta de esfuerzos y temperatura elevada, es posible hacer un comentario sobre las principales aleaciones resistentes al calor.

Con referencia a la composición química de estos materiales, se puede dar la siguiente clasificación:

- Aleaciones de magnesio
- Aleaciones de aluminio
- Aleaciones de titanio
- Aceros de baja aleación
- Aceros inoxidables {
  - ferríticos
  - austeníticos
- Superaleaciones {
  - hierro\_cromo\_níquel
  - hierro\_cromo\_níquel\_cobalto
  - a base níquel
  - a base de cobalto
- Molibdeno y otros metales refractarios
- Materiales cerámicos

Esta clasificación de los materiales resistentes al calor no es arbitraria ya que, en líneas generales, a cada uno de los grupos corresponde un margen de temperatura dentro del cual tienen su empleo más apropiado, además, el orden en que han sido puestos corresponde aproximadamente al de temperaturas crecientes.

Para visualizar, si bien esquemáticamente, lo anterior, se han representado en la figura 13.9 las zonas dentro de las cuales estos materiales varían su carga de rotura en 1 000 horas de trabajo en función de la temperatura.

Una evolución histórica general de estos materiales se incluye en la figura 13.10.

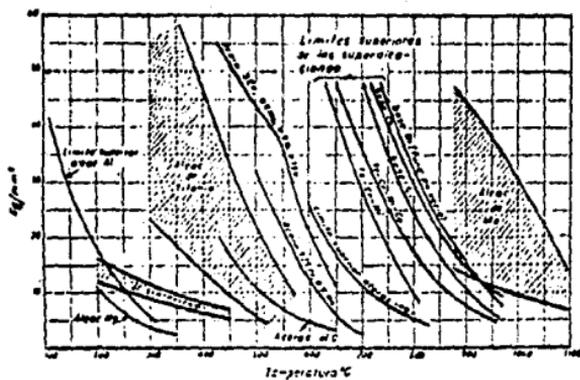


Figura 13.9. Esfuerzos de rotura por fluencia en 1 000 horas de los distintos tipos de aleaciones, en función de la temperatura.

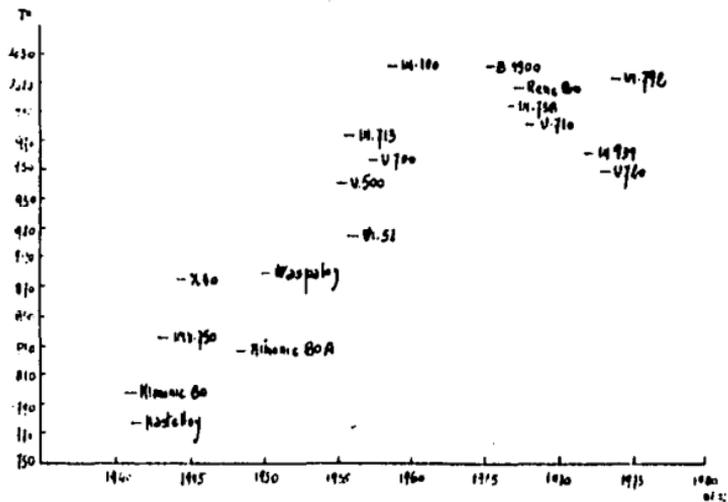


Figura 13.10.

#### Aleaciones de magnesio

Este tipo de aleaciones puede subdividirse en tres grupos: el primero está constituido por aleaciones con aluminio y zinc, las propiedades mecánicas de estos materiales decaen prontamente después de los 175°C; el segundo se basa en aleaciones con circonio y tierras raras (cerio principalmente) que aumentan la temperatura de empleo a los 250°C; el tercer grupo, constituido por aleaciones que contienen hasta el 4% de torio, recientemente desarrollado, permite un empleo hasta los 350°C.

En definitiva, actualmente se dispone de aleaciones comerciales de magnesio para la obtención de piezas moldadas y forjadas para trabajo hasta los 250°C. Es posible pensar en un futuro desarrollo de las aleaciones magnesio\_torio que permita extender hasta unos 425°C el margen de utilización.

#### Aleaciones de Aluminio

Las mejores aleaciones de aluminio para forja, a base níquel, tienen la desventaja de no poder trabajar a más de 250°C. Este valor se puede incrementar con productos obtenidos por pulvimetalurgia (sinterización de polvos oxidados, en este caso de aluminio) hasta probablemente los 500°C.

Por lo que se refiere a las aleaciones de moldeo, se puede repetir lo dicho anteriormente, poniendo en la actualidad el límite máximo de trabajo en los 300°C.

### Aleaciones de titanio

El empleo comercial del titanio y sus aleaciones es muy reciente, debido a que hasta 1940, Kroll descubrió un método industrial para su producción y no fue sino en 1948 que en los Estados Unidos se pusieron en marcha las primeras instalaciones industriales a este propósito.

Su principal característica reside en el alto valor de la relación resistencia/peso específico, muy importante para las aplicaciones en partes en movimiento, o donde la fuerza centrífuga es elevada.

El margen de utilización se creyó por algún tiempo que podría extenderse hasta los 800°C debido a su elevado punto de fusión, pero debido principalmente a su baja densidad, no se puede pensar en superar los 600°C.

Si bien el titanio tiene gran reactividad con el oxígeno a elevada temperatura, la oxidación no es un problema importante hasta sobrepasar los 500°C, que es el límite de temperatura impuesto para las características de fluencia; en cambio, es importante evitar contaminación por hidrógeno que haría al material muy frágil.

Actualmente existen aleaciones comerciales de titanio con excelentes características hasta 500-550°C. Las mejores, cuya resistencia puede ser mejorada con tratamiento térmico, son aquellas que contienen aluminio.

### Aceros de baja aleación

Bajo esta designación se incluyen todos los aceros no inoxidables, tanto los empleados normalmente con fines estructurales a temperatura ambiente, como los especialmente diseñados para elevadas temperaturas. Aunque algunos de ellos no se pueden considerar, en sentido estricto, como de baja aleación; se les puede considerar de esta forma si se comparan con los materiales altamente aleados, tales como los inoxidables y las superaleaciones, de uso en alta temperatura.

Este grupo de aceros constituye el mayor porcentaje del volumen actualmente utilizado para el servicio en caliente y, muchos de ellos tienen buenas características hasta los 550°C. Su empleo se extiende sobre una amplia gama de aplicaciones, entre las cuales resaltan aquéllas para la industria petrolera y, en general, la fabricación de tubos y piezas en contacto con vapor sobrecalentado. Los tipos de características más elevadas se utilizan en partes calientes de turbinas industriales de vapor y gas sometidas a esfuerzos elevados y temperaturas medianas.

Particular muy importante es que sus aplicaciones están limitadas, en muchos casos, más que por la caída de sus propiedades mecánicas, al aumento de la temperatura, por los fenómenos de oxidación o corrosión a que ésta da lugar. Para evidenciar lo anterior, en la figura 13.11 se ha relacionado el incremento de peso por unidad de superficie (medida de la oxidación registrada), después de 1 000 horas de permanencia a una determinada temperatura. Se inclu-

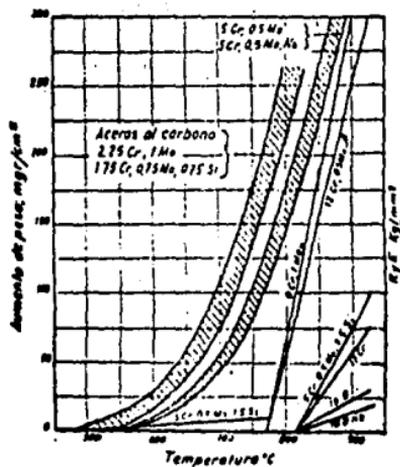


Fig. 13.11. Oxidación de diversos aceros en aire, para una permanencia de 1 000 horas a las temperaturas indicadas

yen también algunos tipos de aceros inoxidable, para que sirvan de comparación. Cabe comentar que el silicio y el cromo influyen favorablemente en la protección contra la oxidación.

En el cuadro 13.2. se muestra la composición de los aceros bajo aleados más representativos.

Los elementos de aleación más efectivos para la mejora de las características mecánicas en caliente para estos aceros, son los que forman carburos (la dureza y, en consecuencia, la resistencia a la tracción del material se encuentra relacionada a la presencia de carburos). Entre los más utilizados y por orden de mayor a menor efectividad, se tienen:

- \* vanadio,
- \* molibdeno,
- \* cromo.

Como ya se ha comentado, una limitación importante de este grupo de materiales es la alta oxidación después de los 500°C. Por esto son muy importantes los métodos de protección superficial, tales como el aluminizado, el cromado y los recubrimientos cerámicos

Algunos tipos de estos aceros, aún algunos de muy baja aleación como el H 46 inglés, fueron utilizados para discos de turbinas de gas, para temperaturas inferiores a los 575°C, este límite es debido a los problemas de oxidación que se presentan y que lo hacen

Cuadro 13.2. Aceros de baja aleación

Tipo	C	Mn	Si	Cu	Mo	Otros
½ Mo .....	0,0/0,35	0,30/0,80	0,1/0,5	—	0,40/0,65	
1 ½ Cr, ½ Mo .....	0,15 max	0,30/0,60	0,5/1,0	1,0/1,5	0,45/0,65	
2 ½ Cr, ½ Mo .....	0,15 max	0,30/0,60	0,5 max	2/2,5	0,8/1,1	
5 Cr, ½ Mo, 1 ½ Si	0,15 max	0,6 max	1,0/2,0	4,0/6,0	0,45/0,65	
9 Cr, 1 Mo .....	0,15 max	0,6 max	0,5 max	8,0/10,0	0,9/1,1	
-17-22A" 9 .....	0,30	0,60	0,75	1,25	0,50	0,25 V
-17-22A" V .....	0,25	0,80	0,75	1,25	0,50	0,85 V
H-40 .....	0,25	0,40	0,40	3,0	0,50	0,50 W
H-46 .....	0,16	0,35	0,40	11,0	0,60	0,75 V
						0,15 Nb
						0,75 V

inutilizable. Estos problemas se pudieron evitar, posteriormente, con el empleo de aceros inoxidables austeníticos.

Los aceros de este último tipo, presentan desventajas respecto a los aceros ferríticos de baja aleación como: mayor coeficiente de dilatación térmica y mejor conductibilidad, lo que corresponde a una menor resistencia al choque térmico (variaciones de temperatura a lo largo del eje del álabe, por ejemplo), mayor dificultad de forja, menor resistencia a temperatura ambiente, mayor contenido de materiales estratégicos, costo de dos a cuatro veces superior.

En la figura 13.12 se ilustran los esfuerzos que producen la rotura por fluencia de los principales aceros ferríticos.

Estos tipos de aceros, en definitiva, son actualmente empleados para la fabricación de la mayor parte de los componentes de turbinas de vapor y para piezas sometidas a esfuerzos de fluencia de no muy larga duración, o bien para partes que deban soportar esfuerzos momentáneos muy elevados y a temperatura muy alta.

#### **Aceros inoxidables**

Estos aceros, como indica su nombre, tiene como principal característica una gran resistencia a la corrosión y a la oxidación.

Entre ellos se pueden distinguir dos tipos fundamentales: los aceros ferríticos de alto contenido en cromo, y los austeníticos

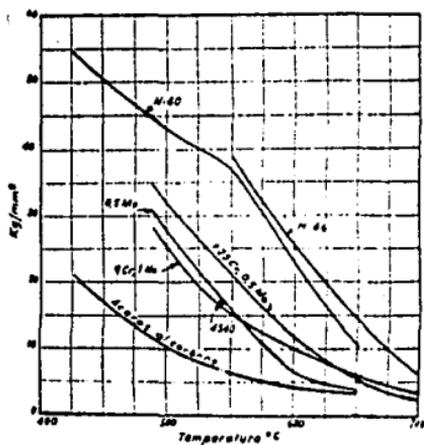


Fig. 13.12. Esfuerzos que producen la rotura por fluencia en 1 000 horas en diversos aceros ferríticos.

al níquel\_cromo, ambos tipos aparecidos durante la primera guerra mundial.

Desde entonces, se han venido desarrollando diferentes tipos, buscando mejorar propiedades mecánicas, ahorrar elementos estratégicos, siempre conservando la capacidad de resistir a la oxidación. Por ejemplo, se ha podido sustituir ventajosamente el níquel con el magnesio.

En el cuadro 13.3 se indican los aceros inoxidable más representativos y su composición. Las figuras 13.13 y 13.14, muestran algunas características de estos materiales.

#### **Aceros inoxidables al cromo**

Según va aumentando el porcentaje de cromo en los aceros, aumenta su resistencia a la oxidación, véase figura 13.11 precedente, alcanzando en el AISI 446 (27% de Cr) unas características extraordinarias, por lo menos desde este punto de vista, ya que puede ser utilizado hasta los 1 100°C.

Sin embargo, este y otro de la misma serie no son muy efectivos del punto de vista mecánico a alta temperatura, debiéndose recurrir por esto a la adición de elementos formantes de carburos, como en el caso del acero H 46, anteriormente mencionado.

#### **Aceros inoxidables austeníticos al cromo\_ níquel**

El tipo fundamental de esta clasificación es el acero AISI

Cuadro 13.3. Aceros inoxidables

	Aceros	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Otros
Al Cromo .....	410	0,15 max	1,0 max	1,0 max	11,5-13,5	—	—	Nb 0,15, V 0,75
	430	0,12 max	1,0 max	1,0 max	14-18	—	—	
	446	0,35 max	1,0 max	1,0 max	23-27	—	—	
	11-46	0,15	0,25	≤ 40	11	—	0,60	
Cr-Ni Austen- ticos .....	302	0,18 max	2 max	1,0 max	18-20	8-10	—	Ti > 5 = C Nb > 10 = C
	304	0,08 max	2 max	1,0 max	18-20	8-11	—	
	310	0,18 max	2 max	1,5 max	24-23	19-22	—	
	316	0,10 max	2 max	1,0 max	16-18*	10-14	2-3	
	321	0,08 max	2 max	1,0 max	17-19	8-11	—	
	347	0,08 max	2 max	1,0 max	17-19	9-12	—	
Endurecibles por precipi- tación .....	17-1 FII	0,07 max	1 max	1,0 max	16-18	3,5-3,0	—	Cu 3-5 Al 1,25 P 0,25
	17-7 FII	0,09 max	—	—	17	7	—	
	HNM, FII (Crucible)	0,30	3,5	—	18,5	9,5	—	
Al Manganeso	201	0,15 max	5,5-7,5	—	16-18	3,5-5,5	—	N 0,25 max N 0,25 max N 0,4
	202	0,15 max	7,5-10	—	17-19	4-6	—	
	Tenelon (U. S. Steel)	0,1 max	14,5	—	17	—	—	

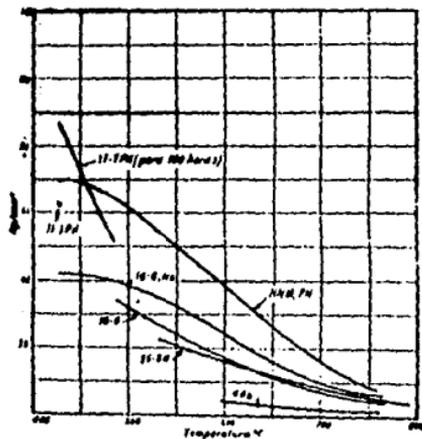


Fig. 13.13. Cargas que producen la rotura por fluencia en 1 000 horas (excepto en el caso que se indica) para varios aceros inoxidables

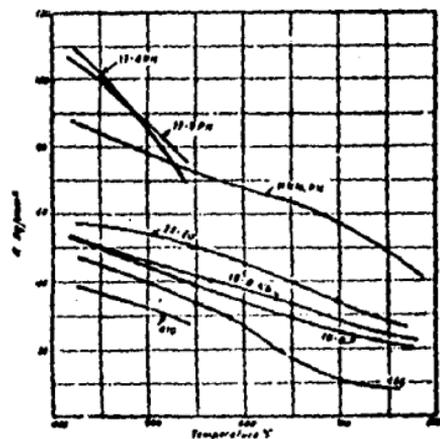


Fig. 13.14. Cargas de rotura a tracción en función de la temperatura, para varios aceros inoxidables.

302; muy conocido también como inoxidable 18\_8. Este tiene buenas características hasta el límite de los 540°C cuando aparece el fenómeno de corrosión intergranular, la cual debilita muchísimo la estructura del material.

Para evitar el fenómeno hay dos opciones: rebajar el contenido de carbono, como el caso del AISI 304 (para que la protección sea efectiva el contenido tiene que ser menor de 0.03%) o bien, adicionar elementos como el titanio o el columbio. Este último procedimiento, más eficaz, es utilizado por los aceros AISI 321 y 347. Otros aceros de alta calidad son los 316 y 310.

Por lo que concierne a las características mecánicas, los aceros inoxidables austeníticos son superiores a los ferríticos, sobre todo los que contienen columbio y/o molibdeno.

Este tipo de acero, sin embargo, no puede aumentar su resistencia mecánica por tratamiento térmico. El solucionar este problema ha sido el objeto de numerosas investigaciones que han desarrollado algunos aceros endurecibles por tratamiento térmico (como el 17\_7 PH y HNM, entre otros) que pueden mantener las características de resistencia a la oxidación intermedia entre las del 304 y el 430, tener una resistencia mecánica superior, por lo menos hasta los 550°C.

#### **Aceros inoxidables al manganeso**

El gran consumo que en la actualidad se hace de los aceros inoxidables y la necesidad de ahorrar materiales estratégicos como

el níquel, ha conducido al desarrollo de aceros en los que se sustituye parcial o totalmente este elemento por el manganeso.

Estos aceros, entre los cuales se encuentra la serie AISI 200, contienen también un alto porcentaje de nitrógeno, que aumenta la resistencia tanto en frío como a temperaturas elevadas.

Por lo que concierne a la resistencia a la oxidación, la eliminación total del níquel ocasiona que el material sea menos inoxidable que el 302.

#### **Superalcaciones**

La fabricación de álabes para turbinas de gas, para partes de motores a reacción y, en definitiva, para aumentar el rendimiento de los ciclos a gas, planteó la necesidad de disponer de materiales que, entre otras características, tuvieran gran resistencia a la fluencia a temperaturas superiores a los 700°C, fuesen inoxidables y resistentes al choque térmico.

La investigación, todavía en acto, ha llevado a las experimentaciones de las denominadas superaleaciones, materiales que reúnen las mejores propiedades conjuntas para servicios hasta los mil grados Centígrados.

Los elementos que entran a formar parte de una superaleación están normalmente equilibrados de forma que se obtengan las propiedades deseadas: por ejemplo, la inoxidabilidad se obtiene con un

alto contenido de cromo (15 - 27%) unido a la presencia de otros elementos, tales como columbio, molibdeno, tungsteno, vanadio; la resistencia a la fluencia con otros elementos, tales como aluminio, titanio, boro.

Otro elemento importante para las características mecánicas es el cobalto. Sin embargo, éste hace al material muy difícil para la forja. A este propósito hay que recordar la discusión referente a la superioridad de las superaleaciones de moldeo o las de forja; con las primeras se obtiene mayor resistencia a la fluencia, mientras que con las segundas hay mayor resistencia a la fatiga y una mayor homogeneidad.

Según su composición química, las superaleaciones se pueden clasificar del siguiente modo:

- \* superaleaciones hierro\_cromo\_níquel,
- \* superaleaciones hierro\_cromo\_níquel\_cobalto,
- \* superaleaciones base níquel,
- \* superaleaciones base cobalto.

En el cuadro 13.4 se enlistan las composiciones de las superaleaciones más significativas. En las figuras siguientes (de la 13.15 a la 13.22), se ilustran algunas características de las superaleaciones más utilizadas.

Sin adentrarse a detalle en el análisis de cada grupo, pare-

Cuadro 13.4. Composición de algunas superaleaciones

Aleación	Cr	Ni	Co	Fe	C	Mo	Si	W	Ti	Al	Otros
<b>Fe-Cr-Ni</b>											
Timken 16-25-8	18	25	--	(50)	0.1	1.4	0.1	6	--	--	0.15 N
19-9 DL	19	9	--	(68)	0.3	1	0.8	1.2	1.7	0.3	0.4 Nb
Hastelloy X	22	43	--	(21)	0.1	1	1	9	0.5	--	--
Inconel 901	12	42	--	(37)	0.05	0.5	0.35	6	--	2.5	0.2
A 290	15	25	--	(54)	0.05	1.2	1	1.2	--	2	0.3
Hastelloy 24	14	20	--	(50)	0.04	1.6	1	3	--	2	0.1
<b>Fe-Cr-Ni-Co</b>											
K-47 B	18	43	22	(13)	0.05	0.1	0.7	--	2.5	0.2	--
N-155	21	20	10	(23)	0.15	1.5	0.5	3	2.5	--	1 Nb - 0.15 N
S-559	25	20	25	(24)	0.4	1.2	0.4	4	4	--	1 Nb
G 18 B	13	10	(55)	0.4	0.8	1	2	2.5	--	--	1 Nb
Refractaloy 26	18	37	22	(18)	0.05	0.7	0.7	5	--	2.8	0.2
Refractaloy 70	10	20	30	(16)	0.4	2	0.5	5	4	--	0.7
Refractaloy 80	20	20	30	(14)	0.1	0.5	0.7	10	5	--	--

Aleación	Cr	Ni	Co	Fe	C	Mo	Si	W	Ti	Al	Otros
<b>Base níquel</b>											
M-252	19	(52)	10	5	0.15	0.5	0.55	10	2.5	1	--
R-233	15	(60)	--	9	0.15	0.8	0.8	5.5	2.5	2	--
Inconel W	15	(75)	--	7	0.04	0.8	0.3	--	2.5	0.6	--
Inconel X	18	(73)	--	7	0.03	0.5	0.3	--	2.5	0.9	0.6 Nb
Inconel 703	15	(48)	28	7	0.15	0.1	0.2	3	2.2	3	--
Inconel 702	19	(38)	--	1	0.03	0.1	0.2	--	1.2	3	--
Inconel 713 C (*)	13	(71)	3	2	0.12	0.5	0.5	4.5	0.7	3	2 Nb
Nimonic 15	20	(73)	--	5	0.10	1	1	--	0.4	--	--
Nimonic 80 A	28	(76)	--	3	0.08	0.7	0.5	--	2.3	1	--
Nimonic 90	20	(58)	18	3	0.05	0.5	0.5	--	2.3	1.4	--
Nimonic 95	20	(34)	18	3	0.10	0.5	0.5	--	3	2	--
Nimonic 100	11	(86)	20	1	0.25	0.3	0.3	5	1.5	1	--
Nimonic 103	18	(54)	20	1	0.20	1	1	8	1.2	4.5	--
Udimet 509	18	(80)	8	4	0.10	0.75	0.75	4	3	3	--
Udimet 500	18	(48)	18	4	0.10	0.75	0.75	4	3	4	0.4 B
Udimet 500	15	(50)	10	1	0.15	0.75	0.75	5	3.5	4.7	0.1 B
Waspaloy	14	(58)	14	2	0.09	0.7	0.4	3	2.5	1	--
Hastelloy B (*)	1	(65)	--	5	0.1	0.8	0.7	28	--	--	--
Hastelloy C (*)	18	(87)	--	5	0.1	0.8	0.7	17	--	--	4 W
Nent 41	19	(50)	11	8	0.12	0.1	0.5	10	3	1.5	0.05 B

Aleación	Cr	Ni	Co	Fe	C	Mo	Si	W	Ti	Al	Otros
<b>Base cobalto</b>											
HS-25 (L-603)	20	10	(51)	1	0.12	1.5	1	--	--	15	2 Nb
J-1370	20	28	(38)	2	0.20	--	--	--	--	7	4 Ti
V 36	25	20	(44)	2	0.3	0.3	0.2	4	2.5	4	2 Nb
S-810	20	27	(45)	4	0.23	1.2	0.4	4	4	4	4 Nb
S-810 moldeo (*)	20	20	(43)	4	0.18	1.2	0.4	4	4	4	4 Nb
S-910 + 3021 (*)	20	20	(42)	4	0.2	1.2	0.4	4	4	4	50 - 1 B
S-216 moldeo (*)	25	8	(53)	2	0.33	1.2	0.4	4	4	4	4 Nb - 1 B
HS-25 (*)	24	17	(51)	1	0.4	0.6	0.6	6	--	--	--
HS-26 (L-251) (*)	19	10	(54)	1	0.4	1.2	0.5	--	--	14.3	0.03 B
HS-21 (*)	27	3	(62)	1	0.25	0.6	0.6	5.5	--	--	--
HS-23 (*)	24	2	(65)	1	0.4	0.3	0.8	--	--	--	--
HS-27 (*)	25	32	(34)	1	0.4	0.3	0.8	--	--	--	--
HS-31 (X-40) (*)	25	10	(55)	1	0.5	0.8	0.6	--	--	6	--

(\*) A la fecha de moldeo

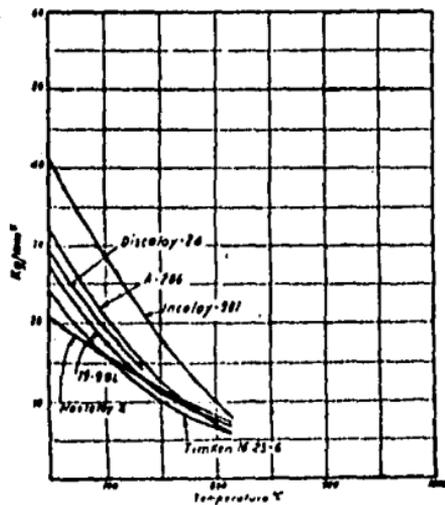


Fig. 13.15. Cargas que producen la rotura por fluencia en 1 000 horas para algunas superaleaciones del grupo Fe-Cr-Ni

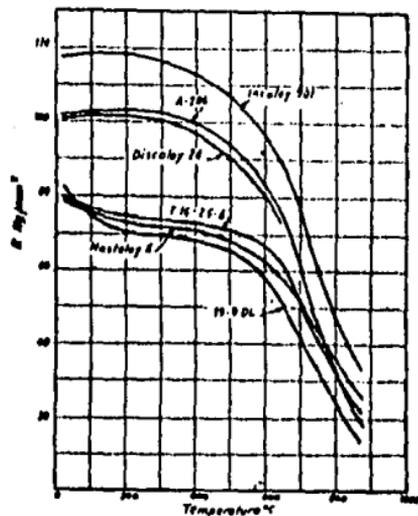


Fig. 13.16. Cargas de rotura a tracción de algunas superaleaciones del grupo Fe-Cr-Ni

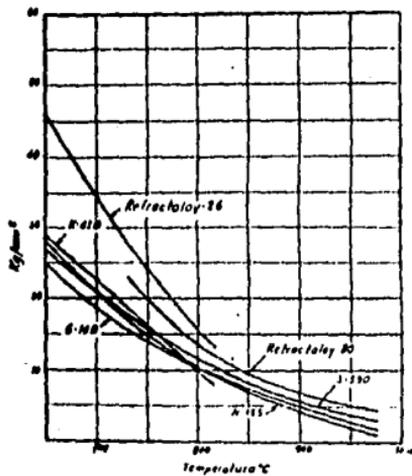


Fig. 13.17. Cargas que producen la rotura por fluencia en 1 000 horas para algunas superaleaciones del grupo Fe-Cr-Ni-Co

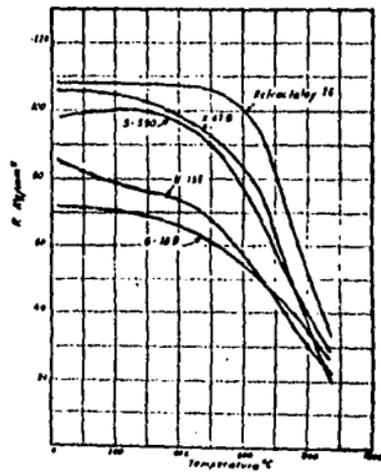


Fig. 13.18. Cargas de rotura a tracción de algunas superaleaciones del grupo Fe-Cr-Ni-Co

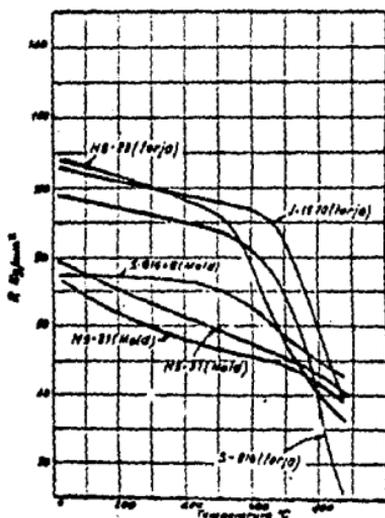


Fig. 13.19. Cargas de rotura a tracción de algunas superaleaciones de base Co

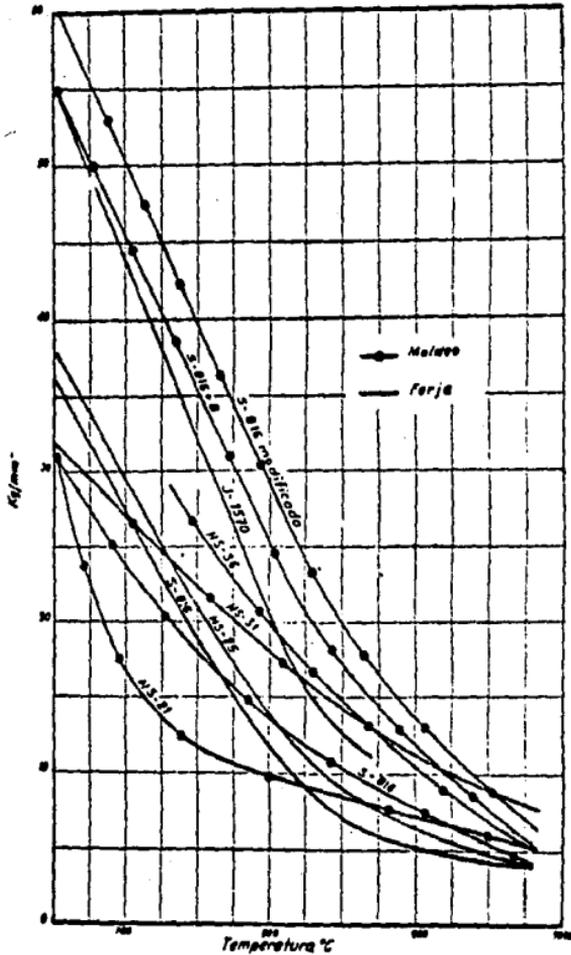


Fig. 13.20. Cargas que producen la rotura por fluencia en 1 000 horas para algunas superaleaciones de base Co

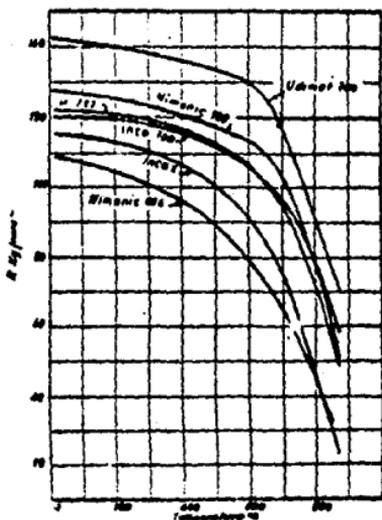


Fig. 13.21. Cargas de rotura a tracción de algunas superaleaciones de base Ni



ce más útil intentar una comparación entre las superaleaciones, en función de la posibilidad y tipo de tratamiento térmico, y del tipo de utilización, es decir, si son aleaciones para moldeo o para forja.

Los tratamientos térmicos posibles de algunas superaleaciones se mencionan en el cuadro 13.5.

La figura 13.23 muestra un resumen de características, representando, en función de la temperatura, las máximas cargas de rotura por fluencia en 1 000 horas, que puede obtenerse con los diferentes tipos de materiales considerados. En la figura puede observarse cómo las aleaciones con base cobalto para moldeo, que hasta los años setenta eran las que presentaban mayor resistencia a la fluencia por encima de los 800°C, han sido superadas por las aleaciones de base níquel fundidas en vacío que pueden alcanzar temperaturas de hasta 925°C.

Debido a que la carga de rotura por fluencia en 1 000 horas es un buen índice para juzgar la resistencia a la fluencia de una aleación, en base a la figura 13.23, se puede deducir que es posible ordenar los distintos tipos de superaleaciones de las más a las menos resistentes, en el rango 600-900°C, del siguiente modo:

- \* base níquel (de forja fundida en vacío y de moldeo),
- \* base cobalto (de moldeo),
- \* base níquel (de forja),
- \* base cobalto (de forja),

Cuadro 13.5. Tratamientos térmicos de algunas superaleaciones

Aleación	Forma (*)	Solubilización			Enfriamiento	
		Tiempo horas	Temperatura °C	Enfriamiento	Tiempo horas	Temperatura °C
<b>Fe-Cr-Ni</b>						
Timken 18-25-6	—	—	—	—	—	—
19-9 DL	—	—	—	—	—	—
Hastelloy X	C	—	1175	aire	—	—
Incoloy 901	C	—	—	—	2	700
A-286	C	—	950	aire	—	720
Dynalloy 24	B	1	1040	aceite	20	730
<b>Fe-Cr-Ni-Co</b>						
K 42 B	B	1	1070	agua	20	700
N-155	B	1	1270	agua	24	815
S-300	B	1	1230	agua	18	780
G-18-B	B	1	1300	aire	—	—
Refractaloy 29	L	1	1150	aceite	20	815
Refractaloy 70	B	4	1290	aceite	24	875
Refractaloy 80	B	4	1230	aceite	20	875
<b>Base cobalto</b>						
HS-25 (L-605)	C	—	—	—	—	650
J-1570	B	4	1175	aire	15	900
V-36	B	1	1230	aire	18	760
S-816	B	1	1175	agua	15	780
S-816 moldeo	M	—	—	—	—	—
S-816 + Soro	M	—	—	—	—	—
S-816 modificado	M	—	—	—	—	—
HS-30	M	—	—	—	—	—
HS-36 (L-231)	M	—	—	—	—	—
HS-21	M	—	—	—	—	—
HS-23	M	—	—	—	—	—
HS-27	M	—	—	—	—	—
HS-31 (X-40)	M	—	—	—	—	—
Aleaciones utilizadas generalmente sin tratamiento térmico						
<b>Base níquel</b>						
M-252	B	4	1070	aire	15	730
M-255	B	—	1175	aire	—	—
Inconel W	—	—	—	—	—	—
Inconel X	—	—	—	—	—	—
Inconel 700	B	2	1175	aire	4	875
Inconel 702	C	—	—	—	5	700
Inconel 713-C	M	—	—	—	—	—
Nimonic 75	C	—	—	—	—	—
Nimonic 80 A	B	8	1080	aire	18	700
Nimonic 90	B	8	1080	aire	18	700
Nimonic 95	B	8	1080	aire	18	700
Nimonic 100	B	2	1200	aire	18	850
Nimonic 103	B	4	1150	aire	10 + 18	1050, 800
Udimet 500	B	4	1050	aire	24	815
Udimet 500	B	4	1080	aire	18	845
Udimet 700	B	2	1150	aire	18	845
Rene 41	B	2	1180	aire	4	980

(\*) C = chapas; B = barras; M = moldes.

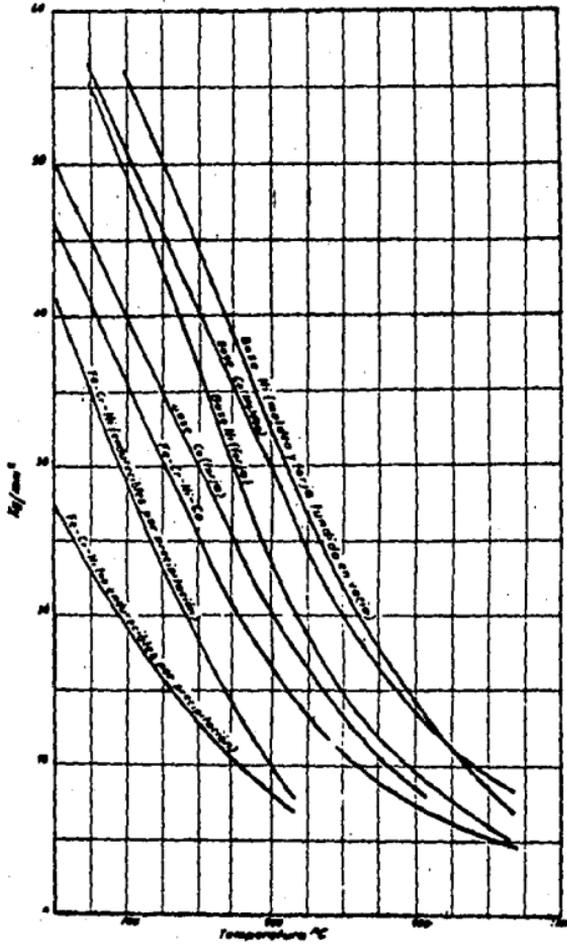


Fig. 13.23. Comparación entre los distintos tipos de superaleaciones. Máximas cargas de rotura por fluencia en 1 000 horas.

- hierro\_cromo\_níquel\_cobalto,
- hierro\_cromo\_níquel (endurecible por precipitación),
- hierro\_cromo\_níquel (no endurecible por precipitación).

Por lo que toca a la resistencia a la fatiga, se puede hacer referencia al cuadro 13.6, entendiéndose que los valores que figuran no son los límites de fatiga, sino las cargas que producen la rotura por fatiga en flexión alternada al cabo de 100 millones de ciclos, en las condiciones de temperatura indicadas. Es evidente que las aleaciones de forja resisten mucho mejor.

La resistencia a la oxidación de las superaleaciones es función de su contenido en cromo. En general, resisten bien hasta 1 200°C en las atmósferas de los motores a reacción. Es importante que el contenido de cromo sea superior al 16% y el de hierro, inferior al 30%.

#### **Otros materiales**

Otros materiales resistentes al calor que se pueden mencionar, aunque las investigaciones en la mayoría de ellos tengan todavía un amplio camino por delante, son: el berilio, los metales refractarios y los cerámicos.

El particular interés por el berilio, radica en su baja

Cuadro 13.6. Cargas que producen la rotura por fatiga en algunas superaleas cignes al cabo de  $10^8$  ciclos

Aleación	$10^8$ C kg/mm <sup>2</sup>	$10^8$ C kg/mm <sup>2</sup>
K 42 B .....	38	27
N-155 .....	43	23
S-390 .....	39	—
Refractaloy 26 .....	30	—
Inconel X .....	46	28
S-816 forjada .....	49	33
S-816 moldeada .....	—	15
HS-21 .....	31	29
HS-23 .....	31	27
HS-31 .....	39	24

densidad, prácticamente igual a la del magnesio; a la resistencia mecánica, tracción y módulo elástico, que es 50% superior a la del acero; y en la gran estabilidad entre la temperatura ambiente y los 650°C. Esto lo hace particularmente interesante para la industria aeronáutica para las partes estructurales de los aviones. Los problemas todavía a resolver se centran en su fragilidad, su costo y su toxicidad.

El desarrollo de materiales refractarios y de materiales cerámicos obedece a la búsqueda de materiales capaces de prestar servicio a temperaturas superiores a los 1 100°C, límite impuesto a las superaleaciones mencionadas por problemas intrínsecos a la estructura cristalina de los metales de aleación y a la temperatura de fusión de los elementos componentes de la aleación.

De los metales refractarios, los más importantes en el estado actual y en el próximo futuro de la tecnología, son el wolframio, el tántalo, el molibdeno y el columbio (o niobio), los cuales combinan su alta temperatura de fusión con resistencia mecánica a temperatura elevada y una disponibilidad razonable.

Los materiales cerámicos denominados Cermet, consisten en la reunión de dos o más materiales cuyas propiedades se complementan para, en conjunto, responder eficazmente a condiciones extremas de servicio. Estos materiales compuestos se obtienen al sinterizar

una mezcla de polvos cerámicos y metálicos. La mezcla se elige de acuerdo con las necesidades específicas. Aunque estos materiales se encuentran aún en desarrollo, se espera que solucionen las exigencias futuras.

13.4.4. Factores que deben considerarse en la elección de materiales resistentes a elevadas temperaturas

La elección del material más apropiado para prestar servicio a una temperatura determinada, superior a la ambiente, debe tener en cuenta una serie de factores que complican extraordinariamente el problema. Los principales de tales factores son:

- 1) Temperatura y cargas
- 2) Vida de la pieza o estructura
- 3) Deformación admisible
- 4) Peso relativo
- 5) Corrosión y oxidación
- 6) Uniformidad de temperatura
- 7) Disponibilidad y costo
- 8) Procesamiento: métodos, efectos.

La influencia de estos factores se examina brevemente a continuación, no debiendo olvidar que todos ellos están interrelacionados y que el criterio de falla adoptado en cada caso para la elec-

ción del material debe ir precedido de un estudio de conjunto sobre las condiciones de servicio.

#### Temperatura y cargas

Para el proyecto de piezas o estructuras que trabajen a temperatura superior a la ambiente, el diseñador cuenta normalmente con datos sobre las características mecánicas que se indican a continuación:

- a) Propiedades derivadas de ensayos de tracción (en función de temperatura): carga de rotura, límite elástico, ductilidad (alargamiento y estricción)
- b) Propiedades derivadas de ensayos de fluencia (en función de la temperatura y del tiempo): esfuerzos que producen la rotura por fluencia, esfuerzos que dan lugar a una deformación determinada.

Conocidas las temperaturas y cargas de trabajo de la pieza, es misión del proyectista dilucidar, teniendo en cuenta el resto de las condiciones de servicio, cuáles de las propiedades enumeradas serán las determinantes de los esfuerzos admisibles y deducir de ello, en función de los datos de laboratorio sobre los diversos materiales, cuál es la aleación más apropiada y los esfuerzos admisibles en la misma.

Es imposible dar criterios generales al respecto dadas las variadas aplicaciones de los metales a elevada temperatura. En

general, se puede decir que cuando las cargas sean momentáneas, las características determinantes serán las incluidas en a), y para cargas continuas, serán determinantes las indicadas en b). No obstante, esto no puede afirmarse de un modo absoluto y dependerá, en definitiva, del examen conjunto de las condiciones de servicio.

#### **Vida de la pieza o estructura**

En todos los casos, es necesario fijar una duración determinada a toda pieza que tenga que trabajar a elevada temperatura.

La vida de servicio varía extraordinariamente según las aplicaciones y es uno de los factores que más hay que tener en cuenta al elegir el material, ya que de ella dependen, en gran manera, los esfuerzos admisibles. La vida de servicio determina, también, en cierto modo, la máxima temperatura de empleo de una aleación.

La fijación de la vida de la pieza responde a las necesidades según la aplicación de la pieza y a consideraciones económicas.

#### **Deformaciones admisibles**

El tanto por ciento de deformación admisible, cuando se trata de cargas continuas, determina, en la mayor parte de los casos, qué tipo de propiedades mecánicas van a fijar los esfuerzos de trabajo. Así, cuando la deformación está decididamente limitada, las características de deformación por fluencia serán casi siempre determinantes. Si se permiten deformaciones apreciables lo serán, en cambio, las propiedades de rotura por fluencia.

co y los esfuerzos a que da lugar alcanzan valores muy elevados.

Es difícil establecer las condiciones de variación de la temperatura y el comportamiento del material de manera exacta; se acostumbra realizar diversos ensayos de calentamiento y enfriamiento sobre los materiales para ayudar en la toma de decisiones al realizar la elección.

#### **Disponibilidad y costo**

El factor costo siempre debe ser tenido en cuenta por el ingeniero diseñador al elegir un material, cualquiera que sea la aplicación de que se trate. Sin embargo, en el caso de los materiales que serán expuestos a elevadas temperaturas, no deben cambiarse las excelentes características de un determinado material ante tales condiciones, por ahorrar un poco de dinero. La disponibilidad de las materias primas para la elaboración de las aleaciones resistentes a las altas temperaturas, se torna estratégica en algunos países e impide su suministro adecuado. Al elegirse un material nunca debe olvidarse el aseguramiento de su entrega en tiempo y costo adecuados.

#### **Procesamiento**

Para obtener las propiedades deseadas en un componente determinado, la composición de los materiales empleados en la manufactura de la pieza es importante, pero no lo es menos la manera de procesarlos. Además, una vez que la composición esté fijada, hay aún

posibilidades de aplicar varias clases de tratamientos térmicos y de endurecimiento por trabajo, para afectar las propiedades del material. El tamaño del grano y su dirección, por ejemplo, son dos factores importantes que necesitan ser controlados (a este respecto es interesante comentar, como modelo, que el grano fino es deseable porque representa buena ductibilidad y alta resistencia a la fatiga, pero usualmente la resistencia a la fluencia disminuye conforme las otras dos propiedades aumentan. Es necesario adoptar, en consecuencia, un compromiso entre las características deseadas)

En la elección de un método de procesamiento dado, también se debe considerar la uniformidad y reproducibilidad de propiedades, variables que dependen del proceso observado, como se ejemplifica a continuación:

Los materiales rolados y forjados exhiben la más consistente reproducción de propiedades, con un mínimo de defectos y rechazos. Los materiales fundidos, por su parte, registran un alto porcentaje de rechazos, hasta el 30%, lo que implica la necesidad de cuidadosas inspecciones.

Los materiales necesarios para las piezas "calientes" de una turbina, deben ser tenaces, duros y resistentes a la deformación. Estas características, sin embargo, son muy diferentes a las tenidas en un material fácilmente forjable o rolado, incluso maquinable. Es por ello que los materiales fusibles cobran cada vez mayor importancia, sobre todo conforme la temperatura de servicio aumenta. El material puede ser tenaz y duro al ser procesado. El método

exige mucha precisión porque operaciones de maquinado y esmerilado de acabado serán difíciles de realizar.

13.4.5. Elección del material a emplear en álabes para turbinas de gas

Algunas directrices que pueden orientar sobre qué propiedades serán las determinantes en la elección del material, y qué tipo de materiales son los más apropiados para la fabricación de los álabes de una turbina de gas se mencionan a continuación:

Álabes fijos o estacionarios de la turbina de gas

Estos componentes son los que están sometidos a las mayores temperaturas de todo el motor. Los requerimientos de los materiales a utilizar en su fabricación son: gran resistencia a la oxidación y corrosión y resistencia al choque térmico para aguantar los rápidos cambios de temperatura, que se originan especialmente en la puesta en marcha y parada del motor. En cuanto a las características mecánicas, no necesitan ser demasiado elevadas, habiéndose sugerido que un criterio aceptable era que la deformación por fluencia no excediese de 0.5% bajo una carga de  $3 \text{ kg/mm}^2$  a  $1000^\circ\text{C}$ .

Aunque se ha empleado extensamente la forja como método de fabricación de estos componentes, consideraciones económicas

han conducido, en general, a la adopción del moldeo por cera perdida como el proceso de fabricación más adecuado. (Comentarios más detallados sobre los procesos de manufactura se realizan más adelante).

En cuando a las aleaciones más utilizadas, varían desde los simples aceros inoxidable tipo 18\_8, en las turbinas con temperaturas de trabajo relativamente bajas; hasta las superaleaciones base níquel o cobalto cuando las temperaturas son más elevadas. Como ya se ha comentado que no se requieren unas características de fluencia excepcionales, es preferible emplear aleaciones en las que no se utilicen el Ti y Al como elementos endurecedores, ya que la presencia de estos elementos complica extraordinariamente el proceso de fusión y moldeo.

La tendencia al aumento de la temperatura de entrada de los gases en la turbina, para incrementar el rendimiento termodinámico, ha conducido al empleo de álabes refrigerados, de los materiales que se han mencionado, obtenidos por moldeo, extrusión o metalurgia de polvos y en los cuales los conductos de refrigeración se realizan por procedimientos especiales como mecanizado por chispa, o bien, disolviendo o volatilizandolos previamente embebidos en la masa metálica.

#### **Alabes móviles de la turbina de gas**

Los álabes del rotor de la turbina están sometidos a la

combinación carga\_temperatura más severa que se encuentra en el motor. En consecuencia, para estas partes, se emplean los materiales de características en caliente más elevadas; el desarrollo de nuevas aleaciones para álabes ha sido el factor que ha gobernado la posibilidad de emplear mayores temperaturas de trabajo, con los consiguientes aumentos de rendimiento.

Las características que deben reunir los materiales para la fabricación de álabes de rotor son, en parte, similares, aunque algo menos críticas (en lo que se refiere a la resistencia a la oxidación y al choque térmico) que las requeridas para los álabes del estator. En cambio, necesitan unas propiedades mecánicas más elevadas, ya que la combinación de las cargas centrífugas y las transmitidas por los gases, da lugar a esfuerzos de consideración, como ya se ha destacado.

Entre diversas aleaciones que sean aceptables desde el punto de vista de resistencia a la oxidación y al choque térmico, la propiedad determinante en la elección del material es la carga de rotura por fluencia. No tienen, en cambio, tanta importancia las deformaciones por fluencia, aunque sus valores deben comprobarse una vez elegido el material y diseñado el álabe.

En la figura 13.24, se ha representado una distribución típica de temperaturas y esfuerzos a lo largo de un álabe de rotor.

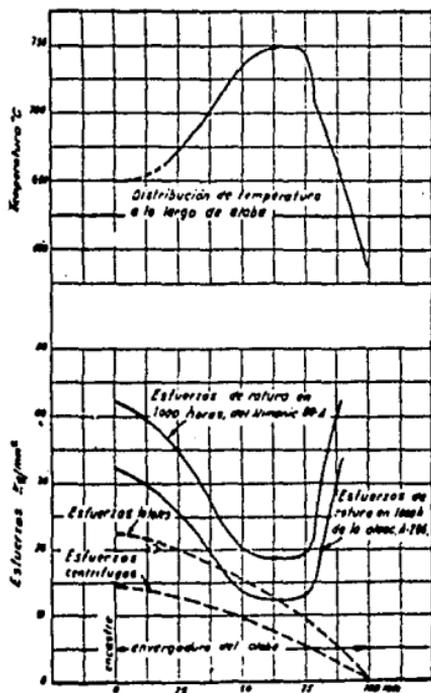


Fig. 13,24. Alabe del rotor de la turbina.  
Influencia de la distribución  
de esfuerzos y temperaturas  
en la elección del material.

Como puede apreciarse, la máxima temperatura se alcanza en un pequeña parte de la longitud del álabe (aproximadamente en la zona comprendida entre el 50 y el 75% de la envergadura contada a partir de la raíz) y que no coincide con la zona donde se desarrollan los mayores esfuerzos. Como las deformaciones por fluencia disminuyen rápidamente con pequeños decrementos de la temperatura, resulta que, en los puntos del álabe correspondientes a la zona de máxima temperatura o próximos a ella, puede alcanzarse el esfuerzo de rotura por fluencia, correspondiente a un número de horas determinado, antes de que la deformación total del álabe llegue a adquirir importancia. Este es el motivo de que la elección del material venga regida por la carga de rotura por fluencia. En la misma figura se han representado los esfuerzos de rotura en 1 000 horas de dos superaleaciones Nimonic 80A y A\_286, a las temperaturas correspondientes a los distintos puntos de la envergadura. Se ve que, construido el álabe con la superaleación A\_286, se produciría rotura antes de 1 000 horas de funcionamiento, en un punto próximo a la mitad de la longitud.

Otra característica a tener en cuenta es la resistencia a la fatiga del material. En los fallos de álabes en servicio se observan con frecuencia roturas por fatiga, bien iniciadas directamente por el proceso, bien en grietas iniciadas por fluencia que, al producir concentraciones de tensiones, continúan después extendiéndose por fatiga. En los casos en que la iniciación ha sido

por fatiga, la localización de las grietas indica que fueron causadas por vibraciones de resonancia. En consecuencia, no bastan las propiedades normales de fatiga para comparar dos materiales, sino que esta comparación debe hacerse teniendo en cuenta simultáneamente su capacidad de amortiguamiento (cabe comentar que el cobalto parece ser uno de los elementos que más mejora la capacidad de amortiguamiento de las superaleaciones).

En cuanto a las aleaciones empleadas normalmente, se han empleado los distintos tipos de la serie Nimonic y superaleaciones base cobalto, pero la tendencia actual, tanto por consideraciones de disponibilidad de este metal, como por la aparición de nuevos materiales de características iguales o mejores que los de base cobalto, es hacia las superaleaciones base níquel con porcentajes de cobalto del orden de un 10%.

De todas formas, la mayoría, por no decir todas las superaleaciones, así como muchos aceros inoxidables, son aplicables a la fabricación de álabes, ya que las condiciones de carga y temperatura varían ampliamente de unos motores a otros y, dentro del mismo motor, de un escalón o etapa a otra de la turbina, en el caso de que exista más de una etapa.

Las curvas de rotura por fluencia en un determinado tiempo de diversos materiales se comparan entre sí, desde el punto de vista de su mayor o menor aptitud para unas condiciones de servicio determinadas.

Respecto a los métodos de fabricación se tienen diversos métodos, que se comentarán con mayor detalle más adelante; los más utilizados, sin embargo, son la forja y el moldeo de precisión (cera perdida o similares), cada uno de los cuales muestra ventajas y desventajas.

### 13.5. Manufactura de los álabes de una turbina de gas

Hay muchas maneras en que los álabes fijos y móviles de la turbina y el compresor de una turbina de gas pueden ser producidos. Entre éstas podemos mencionar:

- 1) Forja
- 2) Cera perdida (fundición de precisión)
- 3) Maquinado
- 4) "Sheet\_stock forming"
- 5) Metalurgia de polvos
- 6) Rolado
- 7) "Mercast" (fundición de precisión con patrones de mercurio congelado).

#### **Forja**

La forja incluye la conformación del metal, casi siempre en caliente, efectuada por aplicaciones individuales e intermitentes de presión. En el proceso de forja puede trabajarse el metal com-

primiendo su sección transversal para aumentar su longitud, oprimiéndolo longitudinalmente aumentando así el área de su sección transversal, o comprimiéndolo interiormente obligándolo a conformarse tomando la forma de alguna cavidad.

La operación de forja puede realizarse en dados abiertos o cerrados. Los formados en dado abierto se golpean nominalmente entre dos superficies planas, pero en la práctica, tienen los dados a veces formas de "V", semirredondas o semiovaladas. Los forjados en dado cerrado se conforman en cavidades de dados y permiten la obtención de tolerancias más estrechas. El forjado puede efectuarse usando la mayoría de los martinets y prensas.

La forja puede dividirse en forja normal y de precisión, dependiendo de las tolerancias exigidas en la pieza.

Las dimensiones de una serie de forjados obtenidos de un dado varían a causa de diferencias en el comportamiento del metal, temperaturas, cierre del dado, desajustes entre las mitades del dado y agrandamiento de las cavidades a medida que se desgastan. Se considera que es buena una tolerancia de 0.794 mm (1/32'') para forjados de acero al carbono pequeños y puede ser hasta de 6.350 mm (1/4''), globalmente para piezas grandes. Se han mantenido tolerancias de 0.254 mm (0.010''), y menos, en forjados prensados de precisión, pero a un costo muy elevado.

La mayoría de los forjados deben acabarse maquinando a tolerancias estrechas y tienen que tener suficiente material en las superficies para el maquinado.

Un forjado puede hacerse más fuerte, más resistente al choque y a la fatiga y más duradero que otras formas. Esto se debe a que puede hacerse de tamaño de grano fino y de estructura fibrosa con la resistencia general máxima en la dirección que se necesite. Por estas características, un forjado puede suministrar las propiedades exigidas con menos peso de la pieza.

Sin embargo, los dados son piezas costosas; lo mismo que la maquinaria necesaria para la aplicación de la presión y las operaciones de acabado, por lo que no es el mejor método cuando se deben producir lotes pequeños.

El proceso de forja fue uno de los primeros que fueron usados y ha sido muy exitoso en la producción de álabes con propiedades uniformes. Se ha desarrollado equipo sofisticado que permite la forja a tolerancias muy pequeñas; sin embargo, siempre es requerido maquinado de acabado.

Por las características mencionadas, el forjado exige, además, la disponibilidad de mano de obra experimentada y calificada.

### Cera Perdida

El proceso de cera perdida es un método de fundición ( la fundición o vaciado es el proceso para formar objetos que consiste en la colocación de un líquido o de un material viscoso en un molde o recipiente que tiene una cavidad con la forma deseada) que permite el uso de materiales que no son fácilmente forjados o maquinados. La mayoría de los materiales resistentes a altas temperaturas, excelentes para los álabes de turbinas de gas, caen dentro de esta categoría.

En ocasiones es necesario emplear un mínimo de maquinado o tallado de acabado y un tratamiento térmico para prolongar la vida de servicio; pero, en general, observando las condiciones exactas determinadas por el metal a vaciar, el álabes fundido conserva la microestructura del material fundido.

Este método permite, además. la obtención, con relativa facilidad, de piezas de diseño complejo que son imposibles o extraordinariamente difíciles de obtener por otros métodos.

En este proceso, el patrón de cera o material plástico es reproducido en un molde de material refractario. Este es calentado a una temperatura relativamente baja para eliminar la humedad; después la temperatura de calentamiento es incrementada para fundir la cera o quemar el plástico del patrón; entonces el molde es cocido

para darle fuerza. El metal a vaciar en la cavidad del molde es fundido y colado; para esto puede usarse un vaciado centrifugo para forzar al metal fundido a llenar el molde. La pieza de metal es obtenida al romper el molde de material refractario, posteriormente limpiada y sometida a operaciones de acabado y tratamiento térmico si es necesario.

En el diseño de las piezas para emplear este método, deben considerarse algunas reglas constructivas básicas, las cuales no resultan un inconveniente muy importante en la complejidad de la pieza.

Este proceso exige un cuidado mayúsculo de las condiciones en que se debe llevar a cabo cada operación, sobre todo en las de fusión del metal a fin de obtener la microestructura deseada en el material y en la construcción del molde refractario, para tener un excelente acabado superficial en la pieza.

El equipo y maquinaria necesarios en este método son relativamente sencillos. El utillaje costoso para las operaciones de acabado se reduce a un mínimo. Los mayores costos los representan los moldes necesarios para la reproducción de patrones.

#### **Maquinado**

El maquinado y tallado han sido usados para producir álabes

de materiales que permiten estos métodos de trabajo. El uso de una sola barra (material uniforme) como materia prima, permite que las piezas terminadas muestren buena consistencia y uniformidad. Este método, sin embargo, exige el empleo de numerosas máquinas herramienta, sobre todo cuando la forma de la pieza deseada se complica; además, algunos de los mejores materiales resistentes a altas temperaturas no son adecuados para ser procesados por maquinado.

Actualmente, debido a que efectivamente el procesamiento eficiente de los materiales más fuertes y duros no era posible con los procesos tradicionales para remoción de material, se han creado varios procesos nuevos y especializados. Algunos de ellos se basan en fenómenos ultrasónicos, químicos, electroquímicos, de electrodesharga y haces de electrones, laser y iones. En estos procesos, las propiedades del material no influyen la remoción del material sobrante, por lo que se puede maquinar material de cualquier dureza y formas complicadas. Sin embargo, estos procesos son excesivamente costosos e implican la necesidad de mano de obra especializada y equipos sofisticados.

#### **"Sheet Stock Forming"**

La fabricación de "sheet stock" empleada para la fabricación de álabes huecos, es un proceso que ofrece numerosas ventajas, tanto desde el punto de vista de la máquina, como del de los costos. Los álabes (fijos y móviles) huecos pueden ser hechos fácil y econó-

micamente; son además, más ligeros que los sólidos correspondientes. Las cargas centrífugas pueden ser entonces reducidas, y hay facilidad para el flujo de chorros de aire refrigerante. Actualmente, la mayoría de los álabes empleados en las turbinas de gas son sólidos y hechos de los materiales que resisten las más elevadas temperaturas. Sin embargo, se espera que en el futuro los álabes huecos tendrán mayor uso dado que el enfriamiento que permiten hace posible el empleo de metales menos críticos.

#### **Metalurgia de polvos**

Las técnicas de metalurgia de polvos han sido económicamente usadas para producir en elevadas cantidades los álabes del estator del compresor axial.

Un material con base hierro en polvo es presionado a la forma deseada en un molde, entonces sinterizado a cerca de 2 000°F (1 100°C) y finalmente acuñado a la forma final. Entonces es impregnado con cobre a elevada temperatura, el cobre llena los huecos en el hierro compacto y forma así una aleación.

Se da posteriormente una "cubierta" de cromo o níquel\_cromo al álabes para proporcionarle resistencia a la corrosión y un tratamiento térmico para producir resistencia adicional. El acabado de los álabes puede incluir pulido o no, dependiendo de las tolerancias requeridas.

#### **Volado**

El proceso de rolado es un método idóneo para la producción de álabes fijos y móviles del compresor, debido a que se dispone de material en lámina adecuado. La lámina es rodada entre rodillos y dados de la forma apropiada, para formar el contorno deseado. Para un álabe de espesor constante y sin "torcedura", se emplea una lámina continua, la cual puede ser cortada a las longitudes apropiadas. Secciones de espesor variable y con "torcedura" pueden ser rodadas, pero el proceso de encarece notablemente.

En cualquier caso, el mecanismo de sujeción del álabe debe ser considerado. La base puede trabajarse para formar algún perfil de raíz o también se puede emplear un enlace soldado.

#### "Mercast"

El proceso Mercast es una técnica de vaciado de precisión de origen reciente. En éste se observa, esencialmente, el mismo método que en el proceso a la cera perdida, excepto que se emplea mercurio congelado para hacer el patrón en lugar de cera.

Mercurio líquido es vaciado dentro de un molde matriz maestro, donde es congelado a temperaturas por debajo de  $-4.5^{\circ}\text{C}$ . Entonces es removido y bañado con un refractario frío hasta que se tenga un espesor aproximado (considerando casos promedio) de 3.175 mm. El cuerpo refractario es secado a baja temperatura. Posteriormente el cuerpo y el mercurio son enfriados a la temperatura ambiente. El mercurio es, en seguida, fundido completamente; el cuerpo refractario es calentado para darle resistencia y es usado, entonces,

como molde en un proceso de vaciado común.

Empleando este método es posible hacer partes complicadas, se pueden obtener tolerancias muy pequeñas y un excelente terminado de la superficie. Sin embargo, el costo de este método es superior al de los otros ya mencionados y descritos.

#### **Recubrimientos**

En numerosas ocasiones, las superficies de los álabes y demás partes calientes de una turbina de gas son "recubiertas" para incrementar la resistencia de las partes a la oxidación cíclica térmica, la resistencia a la corrosión y la resistencia a la fractura por fatiga térmica.

El deterioro continuo en la calidad del combustible, la cada vez mayor contaminación en el aire de entrada y las más severas condiciones de presión y temperatura, necesitan el uso de recubrimientos en las partes a pesar de las mejoras cada vez mayores alcanzadas en las propiedades de las superaleaciones.

Recubrimientos de protección, tales como Ni<sub>2</sub>Cr<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Y, Ti<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>, Co<sub>2</sub>Cr<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Y o Circonato; son aplicados por métodos como :

- a) difusión por paquetes
- b) haz de electrones (electron\_beam)
- c) rocío de plasma (plasma\_spray).

En la difusión por paquetes, los componentes son colocados dentro de contenedores de metal con polvos de los elementos de recu-

brimiento requeridos. Estos contenedores son colocados, entonces, dentro de una retorta la cual es, a su vez, introducida en un horno encendido con gas. La retorta es purgada con gas inerte mientras es calentada a una temperatura predeterminada; después se le permite "remojar" por un periodo de tiempo definido. Durante tal lapso, los elementos del recubrimiento empiezan a reaccionar con la aleación base, a difundirse dentro de la estructura metálica y a crear una zona de difusión y una superficie con la concentración requerida de los elementos deseados. Algunos recubrimientos de este tipo consisten en diversas capas de elementos diferentes y deben ser aplicadas en pasos múltiples. Las ventajas de la cementación por este método son que la composición del recubrimiento y el espesor pueden ser severamente controlados y que el recubrimiento puede ser aplicado sobre cualquier superficie que se desee.

Con el electron\_beam, el proceso de recubrimiento consiste en la deposición de vapor sobre una superficie caliente. El haz de electrones proporciona tanto el calor de vaporización para el compuesto de recubrimiento, como para calentar el metal base.

En el plasma\_spray, las partículas del recubrimiento son calentadas a aproximadamente el punto de fusión antes de ser depositados sobre la superficie del álabe. Las partículas calientes son generalmente protegidas por un gas inerte presente entre la jeringa y la pieza de trabajo a velocidades muy elevadas. El chorro de

partículas de gas que dejan la jeringa tiene una temperatura de 15 000 a 30 000°K, dependiendo de la composición del polvo y una velocidad de aproximadamente 2 400 \_ 3 600 km/hr. El polvo fundido alcanza la superficie de aleación con una muy alta energía cinética, produciendo un recubrimiento con un excelente enlace con el metal base.

### Comparaciones

Los procesos más comúnmente empleados para la producción de álabes para turbinas de gas son: el forjado (con maquinado final si es necesario) y la fundición de precisión a la cera perdida.

Ambos métodos han demostrado su efectividad y, de hecho, existen numerosas discusiones sobre cuál de ellos es el mejor desde el punto de vista técnico, metalúrgico y económico (en este último punto la conclusión suele ser variable en función del volumen de producción, de las condiciones individuales de cada país, etc.)

Es interesante destacar que, aunque estos métodos son muy antiguos, el alto grado de sofisticación que han alcanzado responde a la necesidad de piezas pequeñas y complejas, como los álabes (sobre todo los estacionarios) de una turbina de gas.

Al comparar la fabricación de piezas por microfusión (como también se conoce al proceso de fundición de precisión a la cera perdida) y por forja de precisión, se puede comentar lo siguiente:

La forja de precisión ofrece una gran exactitud, se pueden trabajar tolerancias análogas a las de la microfusión.

En la forja de precisión, el primer calentamiento y los recalentamientos intermedios se llevan a cabo generalmente bajo un gas protector. La temperatura durante las últimas operaciones de forja se mantiene normalmente baja, para evitar una oxidación y una contracción deformadora de las piezas.

En la microfusión, por su parte, el control de la atmósfera y temperatura de fusión y vaciado del metal es muy importante para obtener la composición y microestructura adecuada del metal.

El gran número de estampas de dimensiones escalonadas, el rápido desgaste de las estampas y las numerosas operaciones de corrección y control, hacen que este procedimiento sea costoso. Pero resulta generalmente, en el caso de lotes de producción muy grandes, más barato que la microfusión.

En la microfusión, el máximo costo lo constituye el molde necesario para la producción de modelos de material desechable; mientras que las costosas operaciones de acabado se reducen a un mínimo.

Al decidirse por la fabricación por forja, debe tenerse en cuenta que las estampas están formadas por dos partes, por lo cual no pueden preverse cavidades ni secciones entrantes. Todas las superficies normales al plano de separación deben tener conicidad, para facilitar la conformación y la extracción de la pieza. Estas prescripciones representan unas limitaciones importantes. En la microfusión, la libertad de diseño es mayor.

Al hacer la elección del material, debe considerarse la mayor o menor moldeabilidad en caliente de las aleaciones en el caso de la forja; se tiene, por tanto, una menor posibilidad de elección que en la microfusión.

Mecánicamente, el acero fundido se comporta de modo diferente que el acero conformado en caliente.

Las propiedades del acero fundido no dependen de ninguna dirección, esto es, que la resistencia de las piezas fundidas, diseñadas y producidas apropiadamente, es igual en todas direcciones; no existe ninguna estructura laminaria o segregada. Mientras tanto, por el contrario, en el acero forjado, resultan valores distintos según que se tomen longitudinal o transversalmente a la dirección de la deformación.

Sin embargo, la tenacidad y ductilidad del material fundido son, en general, menores que las del material forjado. Las piezas conformadas en caliente suelen tener mejores propiedades mecánicas por tener grano refinado y orientado en relación al perfil. Por esta misma razón, las propiedades son más fácilmente reproducibles. Aquí ha de señalarse que, a pesar de esta desventaja del material fundido en la obtención de excelentes propiedades mecánicas, una variación en la aleación de este último puede representar, eventualmente, notables mejoras en este sentido.

En relación a las propiedades que determinan el comportamiento de los materiales expuestos a elevadas temperaturas y esfuerzos, se puede comentar lo siguiente:

El material fundido posee mayor resistencia a la fluencia que el forjado; este último, por contra, tiene mejor resistencia a la fatiga. Esta conducta se explica al reconocer que granos muy

pequeños representan una menor resistencia a la fluencia debido a la acción viscosa en el gran número de fronteras de grano, pero esta condición incrementa la resistencia a la fatiga. Debido a que la propiedad más representativa del comportamiento de los materiales a temperaturas elevadas es la resistencia a la fluencia, se estima que, en general, en tales condiciones, los materiales fundidos tienen mejores características que los forjados.

La comparación entre las principales características de la microfusión y la forja de precisión se esquematiza y resume en el cuadro 13.7.

Cuadro 13.7: Comparación entre el proceso de forjado de precisión y la microfusión

	Forjado de precisión	Microfusión
Propiedades que debe tener el material a emplear		Maleabilidad      Fluidez y alta fusibilidad  (consultar ejemplos y propiedades de los materiales en el capítulo a ellos dedicado)
Propiedades de la pieza (la marca indica superioridad comparativa)		
Resistencia a la fluencia <u>1/</u>		X
Resistencia a la fatiga	X	
Resistencia a la tensión = tenacidad = dureza	X <u>2/</u>	
Reproducción de propiedades	X	
Complejidad de forma		X
Ductilidad	X	
Rango de materiales posibles a usar		X

(continúa) ...

1/ Característica más importante a temperaturas elevadas

2/ Por grano refinado y orientado

... (continúa)

Precisión y tolerancias	± 0,254 mm	± 0.127 mm
Terminado superficial	X	X
Peso de las piezas	desde menos de un gramo hasta 100 kg	desde menos de un gramo hasta 50 kg
Costos materia prima	X <u>3/</u>	X <u>4/</u>
Costos herramienta y equipo	X	
Costos mano de obra	X	X
Habilidad exigida en mano de obra	Mucha para el trabajo de calentamiento y "martilleo"	Poca para fabricación del molde, mucha para fusión y colada
Desperdicios de material por necesidades de acabado	Medios <u>5/</u>	Casi nulos
Costos operaciones de acabado	Medios	Muy bajos
Tamaño óptimo de los lotes de producción	Grandes	Medios

---

3/ Requiere de materiales preprocesados

4/ Algunas aleaciones son costosas por la inclusión de materiales estratégicos

5/ Generalmente las piezas forjadas requieren maquinado a fin de obtener la forma, dimensiones y tolerancias necesarias. En el diseño es necesario considerar que debe haber suficiente material en las superficies para poder maquinaslos.

14. Elección de un proceso de manufactura para álabes

14.1. Manufactura de un producto : etapas básicas

El propósito principal de la manufactura es elaborar productos a partir de materias primas. La conversión de materiales en productos para los consumidores, incluye cuatro etapas o pasos básicos en la manufactura:

- 1) Investigación y desarrollo del producto o diseño del producto
- 2) Planeación y herramental para producción
- 3) Manufactura o producción
- 4) Comercialización

como se puede apreciar en el cuadro 14.1 que se ilustra a continuación.

En la selección de un determinado proceso de manufactura, durante la segunda etapa, se deben tener en consideración, en opinión de los expertos, los siguientes factores:

- 1) Naturaleza de la parte, incluyendo materiales, tolerancias, acabados deseados y operaciones requeridas
- 2) Historia de la fabricación, que incluye manufactura de partes o componentes similares

<b>1. Investigación y desarrollo del producto: diseño del producto</b>	
Idea original del producto Conceptualización de la idea y definición del problema Investigación de antecedentes de la idea Búsqueda de patentes Investigación de consumidores e investigación de mercados Estudios de factibilidad y estimaciones preliminares de costos Aprobación de la idea del producto Bocetos preliminares Dibujos preliminares Construcción del primer prototipo o modelo Pruebas del prototipo Modificaciones al prototipo Pruebas finales y aprobación del prototipo Conclusión de los planos para producción (trabajo) Aprobación del prototipo final para producción Solicitud de patente Entrega de planos para producción	
<b>2. Planeación y herramienta para producción</b>	
Planeación de producción Estimaciones de costos Rutas Programas Planeación de materiales Especificaciones Adquisiciones Planeación de herramienta Selección Construcción	Planeación de instalaciones Instalación Distribución física Manejo de materiales Planeación de personal Contratación Entrenamiento Nuevo entrenamiento
<b>3. Manufactura (Producción)</b>	
Iniciar la corrida piloto Hacer los cambios necesarios Programar la plena producción	
<b>4. Comercialización</b>	
Publicidad, almacenamiento, transporte, ventas	

Cuadro 14.1. Las cuatro etapas básicas para la manufactura de un producto.

- 3) Limitación de instalaciones, como pueden ser la planta y equipo disponibles
- 4) Posibilidad de cambios en el diseño del producto, para facilitar la manufactura o la reducción de costos
- 5) Sistemas de manejo de materiales dentro y fuera de la planta
- 6) Procesos inherentes para producir las formas, superficies, acabados o propiedades mecánicas especificadas
- 7) Operarios calificados disponibles para intervenir en la producción
- 8) Requisitos propuestos o previstos para la producción, incluso requisitos de volumen, velocidad de producción y corridas de producción a corto y largo plazo
- 9) Costos totales del producto final
- 10) Monto de la inversión necesaria
- 11) Tiempo disponible para la preparación del herramental
- 12) Recibo, almacenamiento, manejo y transporte de materiales.

En muchas ocasiones algunos de estos factores pueden resultar antagónicos entre sí, y el diseñador debe hallar un equilibrio satisfactorio para tomar una decisión correcta.

Es interesante mencionar que al implementar un determinado proceso de fabricación se pretende lograr de éste ventajas, no sólo técnicas, sino también, a ser posible, económicas. Sin embargo, no debe perderse de vista que es asimismo factible alcanzar indirectamente

tamente una economía en la fabricación de un conjunto, cuando la función, la efectividad o la resistencia de determinados elementos puedan ser mejorados al escoger un determinado procedimiento de fabricación en el que las piezas resultaran ligeramente más costosas. Lo mismo puede mencionarse en relación a los beneficios que a largo plazo, y en otras áreas como asimilación de tecnología, pudiera reportar un determinado proceso.

En el presente trabajo se persigue el destacar la conveniencia de desarrollar un proyecto para la fabricación de álabes para turbinas de gas observando el proceso de fundición de precisión a la cera perdida (o microfusión, o fundición invertida, o fundición por revestimiento, como es también denominado este proceso), por considerar que ofrece las mejores características para la conformación de piezas hechas de materiales resistentes a altas temperaturas los que, en términos generales, no son fácilmente forjables o maquinables (aunque tecnológicamente pudieran resultar con mejores propiedades mecánicas, como ya se ha mencionado). Por sus características, y considerando la tendencia en la industria en el empleo de materiales complejos (superalaciones, metales refractarios y cerámicos) y en la necesidad de piezas de formas complejas, la asimilación de toda la tecnología que involucra: de materiales, de control de condiciones de procesos, etc., es muy conveniente para México en su búsqueda de una menor dependencia tecnológica. Permite, además, la conjunción de diversos esfuerzos dentro de la indus-

tría nacional, los centros de investigación, etc.

Los pasos seguidos en este proceso detalladamente se describen a continuación. En este modo será posible el establecer las exigencias (equipo, material, etc.) de una unidad productiva que adoptara este método, al menos cualitativamente, a fin de evaluar, preliminarmente, la posibilidad de la propuesta.

#### 14.2. Microfusión

##### 14.2.1. Método básico

Se comienza esta procedimiento de fabricación con la producción de un modelo en cera o plástico de la forma y tamaño de la pieza que se desea. Puede labrarse un modelo de una o más piezas experimentales, pero para la producción industrial se inyecta a presión la cera o el plástico en un molde. Este molde matriz tiene la cavidad de la forma que se desea, pero incluyendo tolerancias tanto por la contracción del modelo como por la contracción del metal al solidificarse hasta alcanzar la temperatura ambiente. La matriz puede ser de hule, yeso, madera o metal; dependiendo del material del modelo. La temperatura tan elevada necesaria para la inyección del plástico exige que el molde matriz sea de acero; en el caso de la cera, el molde puede ser de metal blando o de algu-

no otro de los ya mencionados.

La elección del material del modelo depende del tipo de parte a producir, del volumen de producción requerido y por consideraciones económicas. Los modelos de plástico, por ejemplo, tienen la ventaja de poseer una resistencia y estabilidad de forma más elevadas. Pueden ser almacenados con facilidad, lo que permite fabricar grandes series de modelos de un modo económico y disponer así las reservas para el futuro. En general, la producción de los modelos puede ser más rápida y realizarse con una mayor automatización que al utilizar cera. Al ser las temperaturas de inyección más elevadas para los materiales termoplásticos que para la cera, los modelos adquieren más rápidamente la consistencia necesaria para ser extraídos de las matrices sin ser deformados. Sin embargo presentan la desventaja de imposibilitar el uso de matrices de metales blandos, como ya se ha dicho, y se tienen que fabricar costosas matrices de acero, sólo rentables para grandes series.

Las matrices metálicas llegan a tener una vida de hasta 50 000 inyecciones sin necesitar una reparación mayor, siempre y cuando se les proporcione adecuado mantenimiento y fabricación programados.

Los modelos son extraídos de las matrices y verificados. Se desbarban o corrigen pequeñas imperfecciones si es necesario.

Con pocas excepciones, es práctica normal, para que la pro-

ducción sea económica, formar un conjunto, racimo o "árbol", mediante el ensamble de varios modelos individuales unidos con cera (en el caso de modelos de cera) o con adhesivos orgánicos (en el caso de modelos de plástico); estas estructuras son complementadas con canales de colada o bebederos y con respiraderos.

Pueden fabricarse partes bastante complejas y hasta ensamblajes completos uniendo los componentes durante la etapa de la fabricación del modelo en vez de recurrir al ensamblaje de las piezas terminadas después de la operación de colar.

El paso siguiente es el revestimiento de un molde alrededor del modelo.

Los modelos para la fundición invertida de precisión se producen dentro de tolerancias dimensionales muy cerradas, así como una gran exactitud en la forma y en el acabado superficial. Este elevado grado de precisión y acabado es reproducido en la cavidad del molde como consecuencia del proceso de inversión y los materiales utilizados para moldear.

Se emplean dos procesos básicos en la producción del molde: el proceso de molde sólido, o de "bloque", y el proceso de "concha cerámica". En ambos casos, los modelos son cubiertos con una capa de una mezcla de sílice fina por pulverización, por inmersión o por pintado. Este recubrimiento debe ser uniforme y completo, puesto que, una vez eliminado el modelo, es él quien forma la capa interna del molde y determina la calidad de la superficie. Al mismo

tiempo, debe presentar cierta porosidad, para que el aire contenido en el molde antes de la colada pueda ser evacuado al fluir el metal. Sobre este recubrimiento se coloca posteriormente una capa más gruesa de estuco (partículas finas, refractarias y secas). Esta aplicación inicial forma la capa primaria, la que deberá ser serada o endurecida químicamente antes de la aplicación de una capa secundaria o de refuerzo.

En el proceso de moldeo por bloque se produce un molde sólido o bloque alrededor del conjunto del molde recubierto. Se coloca un recipiente con un extremo abierto o "matraz", sobre una placa de base, a la que se ha sujetado el modelo. Se vierte una pasta aguada de material refractario que se adhiere químicamente y forma una capa secundaria. Su misión es proporcionar a la capa interna de grano fino una estabilidad de forma al eliminarse el modelo y al efectuarse la colada, así como evitar que fluya el metal fundido por formarse grietas debidas a esfuerzos y sollicitaciones mecánicas en la capa interna. A continuación se hace vibrar el molde para consolidar y facilitar el escape de las burbujas de aire que hayan quedado atrapadas. Se deja secar el molde sólido en un horno durante algunas horas, pasadas las cuales se eleva la temperatura, de forma que los modelos de cera se derritan y se evacúe la cera o, en el caso de los modelos de plástico, se quemen. A continuación se lleva el molde al horno de cocción en donde se calienta (a aproximadamente 900 \_ 1 200°C) para crear la máxima resistencia en la

liga cerámica, y eliminar igualmente cualquier resto de material del modelo y de humedad. Posteriormente el molde se deja enfriar algo en el horno y cuando tiene una temperatura que oscila entre 600 y 900°C, es llevado a la colada del metal. La temperatura del molde depende de las dimensiones de la pieza y del material a colar. La alta temperatura del molde facilita por una parte el llenado de pequeñas cavidades, y tiene también una gran importancia metalúrgica. Un molde frío da lugar a una dureza mayor en la superficie de la pieza, así como a una estructura distinta de la del núcleo. Estas diferencias aparecen en mucho menor grado en piezas obtenidas por microfusión que en las fundidas en arena. Desde el punto de vista de la maquinabilidad, la superficie de una pieza microfundida no se distingue apenas de su núcleo. Por otra parte, los rechupes del material fundido pueden controlarse mucho mejor en un molde caliente que en uno frío.

El proceso de moldeado por bloque se esquematiza en la figura 14.1.

El proceso de moldeo por concha cerámica, que en buena medida ha superado al proceso de moldeo por bloque, con algunas excepciones, implica la aplicación de capas sucesivas de "lechada" y estuco al conjunto del modelo primario recubierto, debiendo secarse cada capa sucesiva antes de aplicar la siguiente. Un molde de concha completo constará normalmente de seis a ocho capas individuales

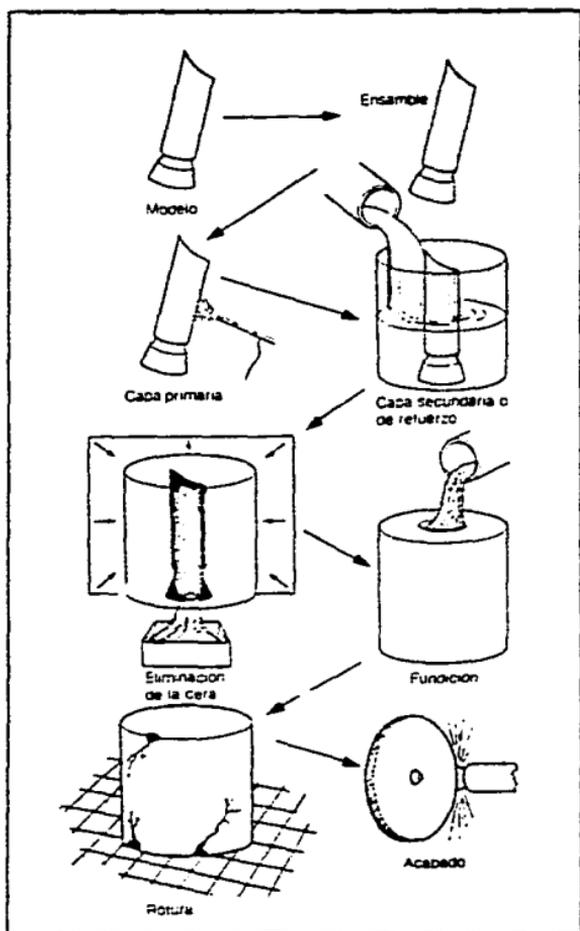


Fig. 14.1. Proceso de moldeado por bloque

de refuerzo, produciendo un grueso final de concha del orden de 12 a 19 mm. La eliminación del modelo desechable puede llevarse a cabo en una autoclave a vapor o en un horno de gas, invirtiendo el molde. Ambos métodos de eliminación del modelo están ideados para aplicar una elevada cantidad de calor a la superficie del modelo en la entrecara modelo/molde. La fusión de la cera o la quema del plástico se efectúa por transferencia de calor, la cera derretida escurre y el molde de concha queda entonces vacío. A continuación el molde se calienta (aproximadamente a 1 000°C), y después se verifica la colada del metal.

Los moldes de concha pueden ser almacenados en "verde" largo tiempo, una vez eliminado el modelo. Esto constituye una ventaja frente a los moldes compactados, los cuales no deben dejarse enfriar una vez sacados del horno (esto porque al tenerse unos 580°C, el material cerámico sufre una recristalización ligada a una variación brusca de volumen, lo cual provoca fácilmente grietas en el molde). Antes de la colada, se llevan los moldes de concha al horno para su cocido.

Los moldes de concha son mucho más ligeros que los moldes compactos; además, presenta este procedimiento otras ventajas como son la simplificación del proceso de moldeo por permitir una mayor mecanización y automatización, el ahorro de material de moldeo, el menor tiempo de tránsito en el taller y como consecuencia, un ahorro de energía y de espacio. Los inconvenientes de este sistema son el rendimiento algo menor de la fusión al necesitarse un bebede-

ro más grande; la posible facilidad de fisuración de la cáscara en caso de haber algún error y la influencia que en la exactitud de las medidas ejerce la resistencia de la cáscara.

Según el tamaño, la forma, el metal y el número de piezas a fundir, y dependiendo de las tolerancias dimensionales, puede resultar más favorable la producción en moldes compactos o bien en cáscara.

El proceso de moldeado por concha cerámica se esquematiza en la figura 14.2.

El paso siguiente del proceso de microfundición es la colada al interior del molde del metal fundido. El modo más simple de hacerlo es por gravedad, pero también se le puede someter a presión originada por aire comprimido o por fuerza centrífuga. Una técnica consiste en hacer el vacío desde la parte inferior de un molde para extraer gases y concentrar la presión atmosférica sobre el metal. Es importante mantener con exactitud las temperaturas de colada. Estas deben ser, por un lado, lo más bajas posibles, para que al solidificar rápidamente den una estructura de grano fino, y, por otro lado, suficientemente elevadas para proporcionar una buena fluidez al material. La temperatura, que depende del metal y de la forma de la pieza fundida, se mide con termopares.

Un gran número de aleaciones ferrosas y no ferrosas; comunes y no comunes, se cuejan por inversión. Los metales más apropiados

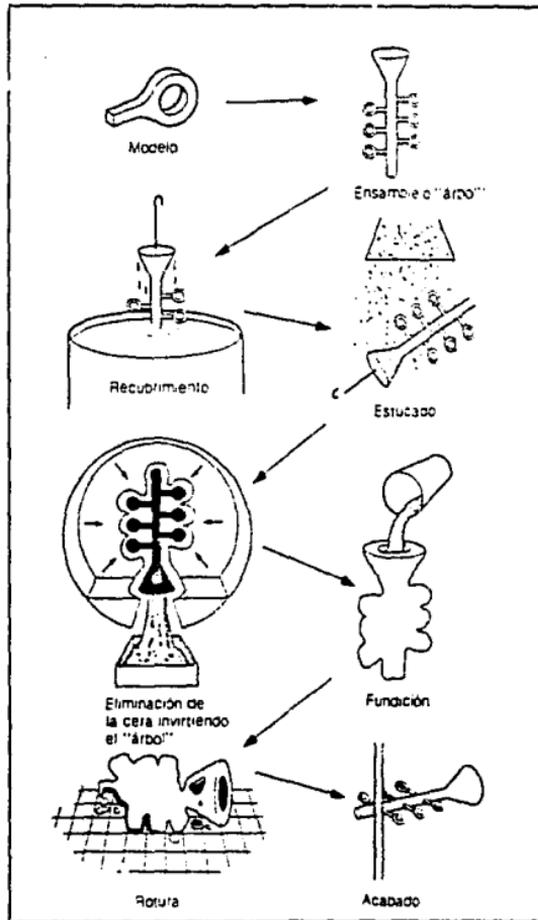


Fig. 14.2. Proceso de moldeado con concha cerámica

para esta operación son los que tienen buena fluidez, encogimiento y solidificación uniforme y poca reactividad química, o inercia química porque la colada por inversión se escoge ordinariamente con el fin de obtener tolerancias pequeñas, detalles finos y secciones delgadas.

Con materiales ferrosos, la fusión del metal para la fundición invertida se lleva a cabo en hornos eléctricos de arco indirecto o de inducción, predominando actualmente el segundo de estos tipos. Con los materiales no ferrosos se emplean hornos reverberantes y de tipo de crisol.

Después de haberse enfriado la pieza vaciada, se rompe completamente el molde. Esto es usualmente hecho por vibración, "sandblast" o limpieza química. Se separan después las piezas individuales del "árbol" y se someten a operaciones secundarias como limpieza, corte o esmerilado de irregularidades y de canalizaciones de colada, etc.

Estas operaciones de acabado se reducen a un mínimo dadas las buenas características dimensionales y superficiales que la pieza debe tener si el proceso ha sido bien observado.

A continuación se someten las piezas a un tratamiento térmico determinado, según el tipo de metal y las necesidades del usuario de la pieza.

Por último, se hacen pasar las piezas por una instalación de chorreado de arena o de granalla de acero (ya hay algunas instalaciones que utilizan fibra de vidrio, obteniéndose de ellas excelentes resultados).

Antes de entregar a la venta, tiene lugar una rigurosa revisión para ver que se cumplan las especificaciones del diseño:

- a) dimensionales: utilizando micrómetros, plantillas o proyectores de perfiles;
- b) estructurales: sometiendo a las piezas a un control de defectos superficiales e internos, empleando diversas pruebas no destructivas.

#### 14.2.2. Ventajas del proceso de fundición por revestimiento

Una breve comparación entre la fundición por revestimiento y otros procesos de moldeo y fundición se muestra en el cuadro 14.2.

En general, por sus características, este proceso:

- 1) permite la obtención de piezas con un elevado grado de exactitud dimensional, acabado superficial, y una posibilidad casi ilimitada de diseño. Estos atributos ofrecen al diseñador la posibilidad de lograr la utilización máxima del material obteniendo un producto realmente funcional;
- 2) permite el uso de equipos relativamente sencillos;

Cuadro 14.2. Procesos de Moldeo y Fundición

	INVERSA	CONJUNTA	MOLDE CENTRIFUGO	FUNDICIÓN EN MOLDES FIJOS	MOLDE DE FUNDICIÓN	FUNDICIÓN POR MOLDEO CENTRIFUGO	FUNDICIÓN CENTRIFUGA
Ángulo que se pueden abrir	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 11	1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11	4, 5	5, 4, 5, 6, 9	1, 3, 4, 5, 6, 9
Características de los piezas	Se fabrican en grandes cantidades de piezas idénticas de formas sencillas	Se fabrican en grandes cantidades de piezas idénticas de formas sencillas	Se fabrican en grandes cantidades de piezas idénticas de formas sencillas	Se fabrican en grandes cantidades de piezas idénticas de formas sencillas	Se fabrican en grandes cantidades de piezas idénticas de formas sencillas	Se fabrican en grandes cantidades de piezas idénticas de formas sencillas	Se fabrican en grandes cantidades de piezas idénticas de formas sencillas
Resistencia de estas a golpes o pesos de gran volumen	Baja resistencia a golpes y pesos de gran volumen	Baja resistencia a golpes y pesos de gran volumen	Alta resistencia a golpes y pesos de gran volumen				
Tamaño y peso del molde	100 a 1000 kg de peso						
Sección de la pieza	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Distancia entre las piezas	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Tiempo de enfriamiento	10 a 100 min						
Forma de enfriamiento	En forma de cubo						
Costo de mantenimiento	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio
Costo de producción	Bajo	Medio	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio
Costo de moldeo	Bajo	Medio	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio

1. Hierro gris

2. Hierro maleable

3. Acero

4. Aleaciones de aluminio

5. Aleaciones de cobre

6. Aleaciones de níquel

7. Aleaciones de zinc

8. Aleaciones de magnesio

9. Aleaciones de aluminio de color y la correspondiente

10. Aleaciones de aluminio

11. Aleaciones de plomo

- 3) al requerir un mínimo de operaciones de acabado, disminuye enormemente la inversión necesaria en herramientas (no hay que olvidar que las que proporcionan excelentes acabados son muy costosas);
- 4) permite ahorros en inversiones de capital de plantas y maquinaria en comparación con procesos de maquinado y forja competitivos;
- 5) permite la reproducción precisa de detalles finos;
- 6) ofrece la ventaja de poder seleccionar la mejor aleación para fabricar una pieza. Esto no puede hacerse con otros métodos por las características de los materiales que los hacen aptos o no para su empleo económico en determinada operación. Aunque hay algunos metales que resultan más apropiados (como ya se ha comentado), es posible colar la mayoría de ellos sin muchos problemas, variando convenientemente el material del molde y las condiciones de fundición y colada;
- 7) permite obtener tolerancias pequeñas; hasta de 0.508 mm, pero éstas exigen, ordinariamente, un costo adicional. Las tolerancias comerciales se encuentran, normalmente, cerca de  $\pm 0.005$  mm/mm;
- 8) permite alcanzar acabados superficiales excelentes;
- 9) permite obtener piezas de peso, desde unos cuantos gramos, hasta 5 kg, pero se han hecho algunas que han pesado hasta 75 kg. El término medio de la producción lo constituyen las piezas de 20 a 500 g ;

permite la hechura de piezas con secciones desde 0.7938 mm hasta 0.3969 mm.

Al tenerse un molde cerrado por todas partes, en el que se deja una única abertura libre, por la cual se elimina primero el material que constituye el modelo y se vierte el metal en estado líquido; se suprime la rebaba a lo largo de las juntas de separación entre moldes, propia de otros procedimientos de colado. Esto permite una mayor exactitud y menores irregularidades en la pieza final.

En resumen, el proceso por revestimiento resulta idóneo cuando se requiere:

- 1) aleaciones de metal, o calidad, imposibles de obtener por otro método;
- 2) un diseño muy complejo, cuyo maquinado o ensamble resultaría muy costoso;
- 3) una gran exactitud en piezas pequeñas y complejas;
- 4) la producción de lotes pequeños de la pieza. Esto se justifica porque el método requiere una menor inversión en maquinaria sofisticada y costosa, exigida por procesos de forja y maquinado competitivos. El mayor costo del proceso lo constituye la hechura de moldes y modelos, pero las operaciones de acabado costosas se reducen a un mínimo; además se verifican ahorros importantes al eliminar el uso de cajas de moldeo y por la utiliza-

ción eficiente del material.

#### 14.2.3. Particularidades constructivas

Es necesario, para que la fabricación por el método de micro fusión sea eficiente y rentable, que se observen ciertas reglas constructivas elementales.

En cuanto a la forma, debe estudiarse, ante todo, la facilidad de fabricación de los modelos. Estos han de poder obtenerse sin requerir para ello un utillaje muy complicado.

En el diseño de las piezas deben evitarse las grandes acumulaciones de material, o en todo caso, disminuirlas haciendo rebajes y perfilados. Lo mejor es que las secciones vayan disminuyendo de forma continua a partir de un extremo de la pieza, y entonces la boca de colada se dispone en la parte de mayor sección. Al contraerse el material por enfriamiento, todavía afluye más material de la boca de entrada, evitándose de este modo la formación de rechupes y depresiones en la superficie de la pieza. Durante la colada, el material que fluye por el canal de entrada va calentando las paredes del molde, lo cual ayuda a mantener líquido el material largo tiempo.

Es importante evitar cambios bruscos de sección en la pieza, pues éstos pueden provocar rechupes o grietas en el exterior. Siem-

pre que sea factible funcionalmente, conviene redondear las aristas vivas, para lo que un radio de unas décimas de milímetro tiene ya un efecto positivo. También convendrá, si en posible, redondear con medias cañas los cambios de sección, admitiendo un radio de 0.5 mm para las piezas pequeñas y de 1 mm para piezas mayores. Además de la mejora en las condiciones técnicas de fundición se consigue la ventaja de que al suavizar los ángulos vivos se evitan muchas veces molestos efectos de entalladura.

Las piezas con grandes superficies planas o de curvatura uniforme son difíciles de fundir. Ello es debido a que la pieza no se solidifica al mismo tiempo en todas las secciones, lo que puede ocasionar depresiones en la superficie. Asimismo, con grandes superficies, en el molde se forman fácilmente grietas (debidas a tensiones) al derretir o quemar los modelos, y tales grietas son causa de rebabas, principalmente en las zonas planas de la pieza. Cada grano de arena desprendido del molde o arrastrado, e incluso cada burbuja de aire adherida al modelo al fabricar el molde, dan lugar a defectos superficiales, los cuales son especialmente visibles y molestos en las superficies lisas.

Estas dificultades pueden obviarse haciendo escotaduras y nervaduras para disminuir las superficies. Sólo se conservan aquellas partes de las superficies que sean necesarias para la resistencia. Las piezas perfiladas resultan más ligeras y en muchos casos de mejor aspecto, sin que por ello se disminuya su resistencia y rigidez.

En general, los bordes afilados (tal como son de desear en los bordes de fuga de los álabes de turbinas) quedan rellenos irregularmente con el material, por lo que aparecen mellas. Para evitar esto, se dispone un refuerzo a lo largo del borde, el cual se mecaniza posteriormente. El radio mínimo que es posible obtener de fundición en un filo, para un ángulo diedro de unos 20 grados, es aproximadamente de 0.4 mm.

#### 14.2.4. Costos

Con respecto a los factores que influyen en los costos, se puede resumir lo siguiente:

Para cada nueva pieza que se desea fabricar hay que construir, normalmente, un molde matriz, en el cual se obtendrán los modelos desechables.

Antes de fabricar la matriz debe decidirse si los modelos serán de cera o bien de material plástico. Este último es, en general, de menor costo, pero no es reutilizable como lo puede ser cerca del 70% de la cera empleada (después de someterla a refinación).

En caso de utilizar cera, el constructor puede elegir entre una matriz de metal blando, una matriz recubierta de acero o bien, una de acero mecanizada. Cuando se utiliza el plástico para los modelos, sólo se pueden utilizar matrices de acero.

Para la fabricación de una matriz metálica de acero se em-

plea, generalmente, el mecanizado por arranque de viruta a partir de acero aleado. La construcción de este molde debe hacerse con especial cuidado, dado que cualquier error en las dimensiones o rayaduras procedentes del mecanizado es son reproducidos en los modelos; en consecuencia, es requerida mucha experiencia y mano de obra calificada para esta operación.

En casos especiales se pueden fabricar matrices de acero mediante electroerosión o por galvanoplastia.

En general, el costo de las matrices de acero es elevado, pero tiene un mayor rendimiento que moldes de otros materiales y permiten una disposición mejor para la extracción del modelo desechable.

El espacio exigido por la pieza en el molde tiene una gran influencia en los costos de la microfundición, mientras que el peso no tiene una gran importancia. El volumen requerido debe disminuirse en lo posible mediante un diseño adecuado al procedimiento, sin mermar por ello las propiedades técnicas de la pieza.

Los aumentos en la proporción de aleación son relativamente poco gravosos. En la determinación de los costos suele tener mayor importancia la colabilidad de un material que la composición química

El exigir tolerancias más estrechas que las que se consiguen normalmente, tiende a elevar los costos.

Al aumentar el número de piezas, cabe esperar una disminución de los costos. Esto se explica al "repartirse" el costo de las matrices entre las piezas obtenidas; de esta manera, además,

En general, los bordes afilados (tal como son de desear en los bordes de fuga de los álabes de turbinas) quedan rellenos irregularmente con el material, por lo que aparecen mellas. Para evitar esto, se dispone un refuerzo a lo largo del borde, el cual se mecaniza posteriormente. El radio mínimo que es posible obtener de fundición en un filo, para un ángulo diedro de unos 20 grados, es aproximadamente de 0.4 mm.

#### 14.2.4. Costos

Con respecto a los factores que influyen en los costos, se puede resumir lo siguiente:

Para cada nueva pieza que se desea fabricar hay que construir, normalmente, un molde matriz, en el cual se obtendrán los modelos desechables.

Antes de fabricar la matriz debe decidirse si los modelos serán de cera o bien de material plástico. Este último es, en general, de menor costo, pero no es reutilizable como lo puede ser cerca del 70% de la cera empleada (después de someterla a refinación).

En caso de utilizar cera, el constructor puede elegir entre una matriz de metal blando, una matriz recubierta de acero o bien, una de acero mecanizada. Cuando se utiliza el plástico para los modelos, sólo se pueden utilizar matrices de acero.

Para la fabricación de una matriz metálica de acero se em-

pueden construirse de modo económico, matrices más adecuadas, lo que implica que es posible producir piezas con mayor exactitud que en pequeñas series. Esto, a su vez, conduce a una reducción en costos, por reducirse el mecanizado posterior.

La configuración complicada de una pieza puede repercutir desfavorablemente en los costos, pero únicamente cuando conduzca a un mayor número de desechos en la colada.

Desde el punto de vista económico, la pieza ideal para obtener por microfusión es pequeña, de forma simple o complicada y, a causa de las exigencias tecnológicas, de material altamente aleado.

Una gran parte de las modernas aleaciones de este tipo presentan dificultades ya en la conformación en caliente; e incluso en algunos casos, esta conformación resulta inasequible. A menudo, también la mecanización se consigue sólo a base de un elevado costo.

Específicamente en el caso de materiales resistentes a altas temperaturas y en relación a la fabricación de álabes para turbinas de gas, debe añadirse todavía a lo anterior, que la forma fluidodinámica deseada en un álabe de turbina es difícil de obtener por medio del arranque de virutas, especialmente cuando se trata de una pieza de pared delgada, muy vulnerable. Mediante el empleo de piezas de fundición no sólo pueden ahorrarse tiempos de mecanización, herramientas y utillajes de fabricación, sino que también

el peso del material necesario es menor que con otros métodos de producción. Debido a los elevados precios de los materiales, este último punto resulta especialmente decisivo.

Además, las formas complicadas de los álabes fijos, o toberas, de las turbinas, plantean problemas de mecanización casi carentes de solución. La microfundición resulta aquí no sólo un método de abaratamiento, sino que es el único que crea por primera vez la posibilidad de hacer realidad algunas construcciones ideales. Plantea, incluso, la fabricación de rodetes completos, piezas con grandes sollicitaciones térmicas, etc.

Mediante un diseño adecuado de las piezas se consigue disminuir la aparición de defectos de fundición. Por otra parte, los métodos disponibles para el ensayo de materiales sin destruir las piezas, permiten rechazar con seguridad aquéllas que son defectuosas

#### 14.2.5. Propiedades de los fundidos

Las propiedades físicas de los fundidos obtenidos por este proceso, hechos bajo buenos controles, se sitúan entre las tenidas en las secciones longitudinales y transversales de los metales rodados o forjados. En efecto, no se alcanzan las excelentes resistencias y durezas que un forjado puede dar. Sin embargo, esta limitación no es muy importante en la mayoría de los casos, porque las propiedades obtenidas son aceptables y el método ofrece otras venta-

jas que suelen ser determinantes en su elección (complejidad de diseño, exactitud, acabado superficial, tamaño pequeño, etc.)

Durante el proceso de microfundición debe tenerse un cuidadoso control de la composición y estructura de las aleaciones utilizadas<sup>1/</sup>. Deben evitarse largas fronteras de grano (presentes si hay granos muy grandes) porque constituyen largos planos débiles; no hay que olvidar que las fallas por carga estable ocurren a lo largo de las fronteras de grano, lo que indica que éstas son zonas débiles. También debe evitarse la precipitación de los constituyentes débiles de la aleación en dichas fronteras porque se agrava, entonces, el problema mencionado.

En la fundición por revestimiento, se acostumbra el manejo de masas pequeñas en cada colada de metal fundido. De esta manera se permite un control cuidadoso y exacto sobre la estructura del metal fundido. La aplicación de tratamientos térmicos para alterar la estructura es posible, pero exige una cuidadosa selección y metodología.

En todas las piezas microfundidas con aleaciones de acero tiene lugar un cierto empobrecimiento de carbono en las zonas próximas a los bordes, debido a que las piezas se enfrían en el molde

---

<sup>1/</sup> Mediante el control de la temperatura y atmósfera de fusión y colada

caliente con relativa lentitud. Adicionalmente, el molde contiene oxígeno del aire en sus poros; además, penetra aire del exterior. Por otra parte, y bajo determinadas condiciones, también puede producirse oxígeno por reducción de óxidos contenidos en el material del molde. De aquí que, a elevadas temperaturas, el carbono en la superficie de la pieza resulte más rápidamente oxidado que los restantes elementos.

La capa pobre en carbono es tanto más gruesa cuanto mayor es la sección de la pieza, puesto que las partes de paredes gruesas permanecen más tiempo calientes que las de paredes delgadas. El espesor de la capa es normalmente de 0.1 a 0.3 mm.

De acuerdo con esto y según las posibilidades, las piezas deberían sufrir un posterior mecanizado; sin embargo, esto redundaría en una elevación de los costos, por lo que es práctica común al elegir la aleación y las condiciones de colada de manera que sólo se produzca una escasa descarburización, la cual es finalmente compensada mediante un tratamiento térmico especial.

#### 14.2.6. Materiales a usar en microfusión para la producción de álabes para turbinas de gas

Aunque los requerimientos de especificaciones del metal no son limitantes importantes para usar este método en un caso dado, hay materiales que resultan más adecuados. En efecto, el material idóneo para el proceso de microfusión es aquél que tenga elevada

fluidez (para que "escurra" fácilmente y llene perfectamente las cavidades de los moldes) y elevada fusibilidad (esto es, que el material funde fácilmente)

A continuación se presenta una breve consideración sobre el empleo de materiales resistentes a altas temperaturas, los necesarios para la fabricación de álabes para turbinas de gas, en la manufactura de piezas observando el método de fundición por revestimiento.

Recordando lo manifestado en el apartado de materiales y ampliando los conceptos y datos mencionados, se tiene,

El constructor de turbinas exige hoy materiales que posean, a las más altas temperaturas posibles, una elevada resistencia a la fluencia junto con buena tenacidad, una mayor resistencia a la oxidación y a la corrosión incluso contra cenizas, menor sensibilidad a la entalladura y suficiente estabilidad frente a los cambios de temperatura. Al mismo tiempo, los materiales deben ser soldables, de fácil mecanización y no demasiado caros.

La exigencia de mayores cargas admisibles a medida que aumentan las temperaturas de servicio, conduce a una proporción cada vez más grande de adiciones que dan origen a carburos en aceros y aleaciones austeníticas resistentes en caliente; con ello disminuye la maleabilidad y la ductibilidad y aumenta el precio. Este proceso obliga a los fabricantes de turbinas a utilizar en mayor

medida el procedimiento de microfusión. La producción de álabes de turbinas constituye, de hecho, la primera introducción a escala industrial del procedimiento de microfusión.

Los aceros con 12% de cromo y adiciones especiales de molibdeno, vanadio, wolframio y cobalto pueden utilizarse hasta temperaturas de unoa 600°C. Poseen buena ductilidad para valores elevados del límite de elasticidad en frío y en caliente; de todos modos, tienen el inconveniente de ser difíciles de fundir y de tender a la formación de asperezas en la superficie. Esta, en verdad, resulta mejorada, con respecto a otros aceros al cromo, por la adición de vanadio y cobalto, pero no se puede comparar con la de los aceros y aleaciones austeníticas, sobre todo con los de base de cobalto.

Los aceros austeníticos al cromo\_níquel con adiciones de niobio, eventualmente molibdeno, vanadio y wolframio son apropiados para temperaturas de trabajo de hasta 700°C.

Los materiales de gran resistencia en caliente aleados con cromo, níquel y cobalto, con adiciones especiales y contenidos de hierro entre 30 y 60% trabajan en máquinas con temperaturas de servicio hasta un máximo de 800°C.

En la zona de temperaturas entre 600 y 850°C, compiten entre sí las aleaciones con bases de cobalto y de níquel. Para la fabricación por fundición, las aleaciones ricas en cobalto poseen las ventajas de una colabilidad especialmente buena, un manejo seguro y la supresión del tratamiento térmico. A favor de las aleaciones

de níquel se encuentran el precio de este metal, menor que el del cobalto, y la escasa tendencia a la fragilidad que algunas aleaciones manifiestan después de largo tiempo de servicio.

Para casos de aplicación que condicionan fuertes sollicitaciones a temperaturas por encima de 850°C, las aleaciones de níquel poseen con respecto a las de cobalto la ventaja de una mayor resistencia a la fluencia en función del tiempo y, para temperaturas muy altas, también mayor resistencia a la corrosión.

El desarrollo de aleaciones de níquel resistentes a las máximas temperaturas sólo fue posible mediante la fusión y colada en vacío y mediante la adición de pequeñísimas cantidades de elementos como boro y circonio. En condiciones de vacío (o atmósfera inerte), los gases perjudiciales que estaban disueltos en la aleación quedan eliminados, y parte incluso desaparecen algunos que estaban ligados en forma de impurezas. Además, con los elementos aluminio y titanio, altamente activos, se impide la oxidación. Las adiciones de titanio y aluminio mejoran muy sensiblemente la resistencia a elevadas temperaturas en función del tiempo, pero en cambio empeoran la ductilidad de las aleaciones de níquel. Aquí puede encontrarse un equilibrio mediante el tratamiento en vacío.

También con reducidos contenidos de boro y circonio se consigue una mayor resistencia a elevadas temperaturas e incluso aumenta simultáneamente la ductilidad. El boro tiene un tamaño atómico medio que se encuentra entre los del níquel, cromo y hierro, por una parte, y el carbono y nitrógeno, por otra. Por ello se acumula

en los puntos de interrupción de la retícula, sobre todo en los límites de los granos. Entonces, debido al refuerzo de la red, quedan disminuidas las tensiones estructurales. Pero al mismo tiempo, la pequeñísima adición de estos elementos impide también la formación de núcleos para segregaciones, retardando con eso cualquier transformación de la estructura.

Las aleaciones resistentes a altas temperaturas son casi siempre manipuladas totalmente en condiciones de vacío; es decir, son profundidas, refundidas y coladas bajo vacío.

La manipulación en vacío significa, claramente, una elevada inversión. Pero con ello se logra un aumento de resistencia, (como se puede apreciar en la gráfica anexa) y, lo que todavía es más importante, se evita la formación de inclusiones de difícil eliminación, de las que no se sabe aún en qué medida son perjudiciales.

Algunas de las aleaciones fundidas en vacío poseen excelentes propiedades de resistencia a temperaturas muy altas, pero presentan oscilaciones en su coeficiente de contracción lo que exige un mayor cuidado por parte del fundidor si desea obtener piezas de elevada calidad. Véase figura 14.3.

Las aleaciones con gran contenido de níquel ofrecen buenos valores de resistencia incluso a temperaturas por encima de 1 000°C. Pero, naturalmente, tales materiales pueden introducirse de modo económico sólo cuando poseen suficiente resistencia a la corrosión.

En la tabla mostrada en la figura 14.3 se comprueba la

tendencia a conseguir mayores resistencias con aleaciones más complicadas. De modo general, disminuye el contenido de cromo, mientras que aumentan los de titanio, aluminio, wolframio, etc.

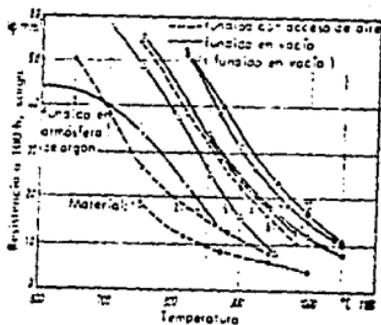


Fig. 14.3. Resistencia de las aleaciones de níquel de la tabla que completa esta figura, para la rotura tras 100 horas de carga, en función de la temperatura de ensayo

(continúa)...

Tabla: Composición química y propiedades a temperatura ambiente de los materiales a base de níquel

N°	Material	Fusión y colada en	Composición en % del peso											Propiedades mecánicas a 20 °C					
			C	Cr	Co	Mo	W	Fa/Nb	Ti	Al	B	V	Ni	Limite el. 0.1% en kg/cm²	Limite el. 0.2% en kg/mm²	Alonga. mínima en %			
1	Himocast 242		0,3	20	10	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	Destro	27	49	0,0
2	Himocast PE 10	Argón	0,05 máx.	20	—	6	2,5	8,5	—	—	—	—	—	—	—	Destro	47	66	10
3	Himocast 713 G		0,1	12	—	4,5	—	2	0,6	6,0	0,01	—	—	—	—	Destro	—	81	5
4	Himocast 90	Argón	0,1	20	16	—	—	—	2,4	1,2	—	—	—	—	—	Destro	52	71	14
5	01 55		0,15	15	—	4	2	—	2,5	2,5	—	—	—	—	—	Destro	60	79	8,5
6	Himocast 713 V		0,1	14	—	4,5	—	2	1,0	0,2	—	—	—	—	—	Destro	—	—	—
7	01 65		0,13	11	—	3	4	2	—	6	0,25	—	—	—	—	Destro	48	67	3,5
8	01 100 (EPK 24)	Vacío	0,15	10	15	3	—	—	5	5,5	0,05	—	—	—	—	Destro	—	—	—
9	01 81		no hay datos											Destro	—	—	—		
10	01 20 VG		no hay datos											Destro	—	—	—		
11	01 215		0,15	15	—	5	—	—	2,0	3,0	0,07	—	—	—	—	Destro	62	80	8
12	01 215		0,10	12	10	—	—	—	4,5	4,5	0,07	—	—	—	—	Destro	60	80	8
13	01 215		0,10	12	10	—	—	—	4	—	0,07	—	—	—	—	Destro	60	80	8
14	01 215		0,10	12	10	—	—	—	4	—	0,07	—	—	—	—	Destro	60	80	8
15	01 215		0,10	12	10	—	—	—	4	—	0,07	—	—	—	—	Destro	60	80	8

Indicaciones: N° 2: 3 horas a 1100°C; N° 3: 3 horas a 1100°C; N° 4: 3 horas a 1100°C; N° 5: 3 horas a 1100°C; N° 6: 3 horas a 1100°C; N° 7: 3 horas a 1100°C; N° 8: 3 horas a 1100°C; N° 9: 3 horas a 1100°C; N° 10: 3 horas a 1100°C; N° 11: 3 horas a 1100°C; N° 12: 3 horas a 1100°C; N° 13: 3 horas a 1100°C; N° 14: 3 horas a 1100°C; N° 15: 3 horas a 1100°C.

15. Equipo necesario en una planta productora de álabes para turbinas de gas que observe el proceso de micro-fusión

El proceso de microfundición puede resumirse como sigue:

- 1) Construcción de la matriz que contiene la impresión de la pieza a producir
- 2) Producción y ensamble de los modelos gastables
- 3) Recubrimiento del modelo hasta formar un molde de material refractario
- 4) Eliminación del modelo
- 5) Cocción del molde
- 6) Fusión del metal
- 7) Colada del metal
8. Tratamiento térmico y operaciones de acabado.

De acuerdo con la descripción anterior, el proceso de microfundición exige:

- 1) Equipo para la producción de modelos
- 2) Equipo para la producción de moldes
- 3) Equipo para la fusión del metal y colada del mismo
- 4) Equipo para la limpieza y el acabado de las piezas

- 5) Equipo para tratamiento térmico
- 6) Equipo de medición y control.

A partir de esta información, es posible ejemplificar un proceso para la fabricación de álabes en forma cualitativa, estableciendo algún equipo por el que es posible realizar las operaciones indicadas por el método.

El presente trabajo no pretende el proponer una unidad productiva determinada, trabajo que involucraría la consideración de todos y cada uno de los factores mencionados anteriormente, sólo intenta el establecer la conveniencia de la producción de álabes para turbinas de gas por medio del proceso de fundición a la cera perdida, a partir de la cual se pueda iniciar un proyecto en forma detallada. Sin embargo, siempre es necesario el realizar una consideración económica, aunque sea preliminar y asumiendo datos estimados promedio.

Es por ello que se considerarán los tiempos y consumos del equipo que se menciona al final de cada descripción para el breve análisis económico. Tal equipo quedó establecido a partir de los siguientes supuestos.

- 1) Microfundición con capacidad para fabricar piezas de acero y de superaleaciones en series medianas y pequeñas, de piezas misceláneas de, aproximadamente, peso fluctuante entre 25 y

500 gramos<sup>1/</sup> (el volumen mayor está representado por piezas de 60 gramos)

- 2) La capacidad productiva de una microfundición queda determinada por la capacidad del horno de fusión del metal. Se considerará el empleo de un horno de inducción con crisol para 5 lb, con potencia de 15 KW, de energía eléctrica trifásica de 18 KVA; energía absorbida 23 amp; 9.6 KHz
  
- 3) Con cada colada del horno será posible el obtener 1 kg de álabes con las cualidades suficientes para salir a la venta. Las consideraciones de pérdidas y necesidad de material adicional se especifican en el análisis económico.
  
- 4) El equipo para la producción de modelos y moldes responde a la necesidad de fabricar "estucos\_moldes", cada uno, en promedio, con capacidad para producir 16 álabes de 60 gramos cada uno.

Todas estas consideraciones responden a la capacidad necesaria para cubrir el 50% (aproximadamente) de la demanda de álabes

---

1/ Los álabes de una turbina de gas de mediana potencia tienen un peso que oscila entre los 25 y los 500 gramos. No hay que olvidar que estas piezas deben ser de poco peso.

para turbinas de gas, como se aprecia en el estudio de mercado incluido en el apartado correspondiente.

Se estima, en base a una investigación de precios directa, que el equipo que se indicará involucra, en conjunto, una inversión global de aproximadamente 100 000 000 de pesos. Este monto ha sido evaluado en junio de 1986.

#### 15.1. Equipo para la producción de modelos

Considerando que los modelos desechables sean de material termoplástico<sup>1/</sup> (con el que es posible producir componentes exactos, con una superficie excelente, a bajo costo y con gran rapidez), por resultar un material barato y de fácil obtención en México (país productor de petróleo y con una industria petroquímica importante), se requiere la instalación de equipo que permita que el material fluya plásticamente dentro de las formas deseadas.

Los procedimientos más comunes en la formación de piezas de material termoplástico son: el moldeo por inyección y la extrusión.

El moldeo por inyección resulta el de mayor interés en el caso en cuestión; consiste en la alimentación del polímero en polvo

---

<sup>1/</sup> Los plásticos son materiales compuestos por moléculas largas en cadena, llamadas altos polímeros. Se pueden dividir en dos clases: termoplásticos y termoesfables. Los primeros fluyen y funden cuando se calientan. Los segundos son infusibles sin degradación térmica o mecánica.

dentro de un barril, en su fusión y en la posterior inyección de la resina líquida dentro de un troquel, seguida por solidificación y eyección.

Un corte transversal de una máquina típica de moldeo de material plástico por inyección se ilustra en la figura 15.1. La presión de trabajo necesaria para la operación puede suministrarse por medios hidráulicos, neumáticos, mecánicos o eléctricos.

El troquel que se ha mencionado constituye el molde matriz del proceso. Debe construirse éste de acero especial y debe maquinarse en él la cavidad del álabe que se desea producir. Este trabajo debe hacerse con sumo cuidado, estimando los efectos de contracción y dilatación de los modelos y del metal en operaciones subsiguientes, y evitando errores de maquinado que, de presentarse, se reproducirían en el modelo, ocasionando errores en toda la producción. Tal matriz debe, pues, encargarse a expertos en el maquinado. Su costo es elevado.

Cuando se emplea material termoplástico en la elaboración de modelos, la unión de los mismos para formar "racimos" o "árboles" así como la colocación de canales, debe llevarse a cabo con adhesivos orgánicos, por lo que debe considerarse su adquisición, probablemente con el mismo proveedor del material plástico.

Para el análisis económico, se considera que esta operación

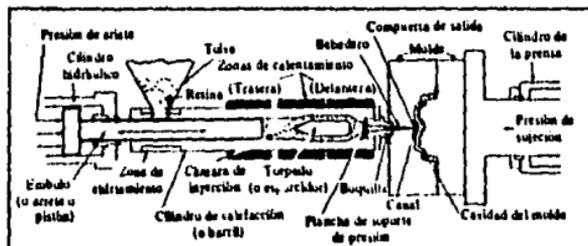


Fig. 15.1. Corte transversal esquemático de una máquina de moldear por inyección de émbolo buzo (o ariete o pistón)

de fabricación de modelos desechables se efectúa haciendo uso de una máquina inyectora de plástico con capacidad de 150 g por inyección y 10 hp de potencia, accionada neumáticamente.

#### 15.2. Equipo para la producción de moldes

Una vez obtenido el modelo de plástico, es necesario reproducir su forma en un molde de material refractario.

Por los ahorros que representa (y que se han mencionado en la descripción detallada del proceso) y por el hecho de que pueden ser almacenados "en verde", se considera que el método de los moldes en concha es el adecuado en el caso de producción de álabes.

Para la aplicación de las capas sucesivas de polvos refractarios, se deben observar las siguientes operaciones:

El árbol se recubre de coloides (partículas muy finas y refractarias suspendidas en un líquido aglutinante) al sumergirlo en un mezclador eléctrico a este propósito; posteriormente se "estuca" empleando para ello una "cama fluidizada". Esta unidad consiste en un depósito de polvo suspendido en un chorro de aire y agitado en movimiento rápido. Las partículas se adhieren sobre la superficie de la pieza para formar una película uniforme. El dispositivo se ilustra en la figura 15.2. El polvo aparece en partículas y se sitúa sobre un lecho de aire que pasa a través del lecho poroso

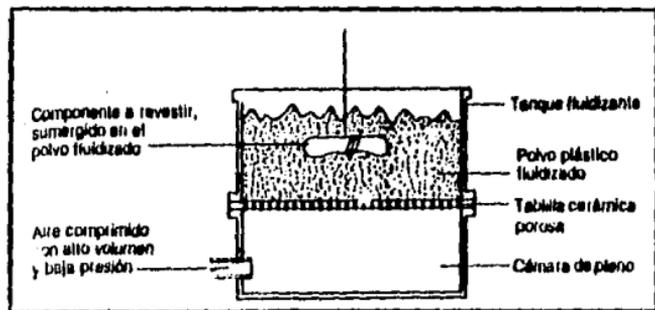


Figura 15.2. Cama Fluidizada

desde la cámara de pleno. El aire levanta el polvo, haciéndolo burbujear en forma continua hasta que cae de nuevo. Con este dispositivo, en una sola inmersión pueden aplicarse recubrimientos cuyo espesor fluctúa entre 6 y 60 mils. Estas capas son teraas, quedan sujetas firmemente, de espesor constante y cubren perfectamente esquinas y aristas.

El secado de los "árboles estucados" puede verificarse en un cuarto especial en el que circule aire caliente.

La cocción del molde, necesaria para la liga cerámica de la sílice, que dará resistencia al molde; exige la instalación de un horno para el cocido de cerámica. Este horno puede ser de diversos tipos y emplear diferentes combustibles.

Para el análisis económico, se considera que estas operaciones se realizan empleando el siguiente equipo:

Un mezclador eléctrico para la mezcla de coloides, con capacidad de tina de 30 galones y accionamiento eléctrico con un motor de 1 hp.

Una unidad de cama fluidizada para recubrimiento de árboles con polvos refractarios, con dimensiones de 20'X 20'X 42'', sistema de filtro integrado a 24'' de altura de tina y accionamiento neumático mediante su acoplamiento al sistema de aire de un compre-

sor.

Un compresor de 5 hp, con una resistencia de 500 W, 16.5 ft/min, 175 lb/in<sup>2</sup> y tanque de 120 galones.

Un cuarto de secado de árboles estucados, con un circuito rotatorio de cadenas porta\_árboles, accionadas por un motor de 1 hp, y con circulación de aire caliente para el secado, esta última operación empleando dos motores eléctricos de 0.25 hp.

Un horno para cocido de cerámica, operado con diesel, con dimensiones internas de 1.0m X 1.0m, con dos líneas de tabique de revestimiento, una aislante y otra refractaria.

### 15.3. Equipo para la fusión y colada del metal

Las aleaciones necesarias para la fabricación de álabes para turbinas de gas exigen la fusión y colada al vacío, método que se explica brevemente a continuación:

En la moderna metalurgia, es un hecho que la fusión al vacío<sup>1/</sup> es imprescindible, tanto para la obtención de metales de gran

---

<sup>1/</sup> Esto es, la operación tiene lugar en una cámara de calentamiento del horno con atmósfera artificial. Tal atmósfera consiste en la sustitución del aire (oxígeno) por otro gas o mezcla de gases.

pureza, tales como el tántalo, uranio, tungsteno, molibdeno, etc., como para fundir aleaciones de alto punto de fusión o muy reactivas (sobre todo con el oxígeno y el nitrógeno presentes en el aire), como para la desgasificación de los aceros de uso normal, a los que cada vez se exigen más y mejores características. Esta técnica mejora la calidad, pues, por un lado, aspira los gases que se producen durante la fusión, con lo que se obtienen piezas más compactas, y por otro, al descender la presión en el horno, baja también la temperatura de fusión de los metales, al ser menor la tensión máxima del vapor. El acero desgasificado, además, mejora las características mecánicas ya que gases como el  $H_2$ ,  $CO_2$  y  $N_2$ , son los causantes de la presencia de burbujas que merman las cualidades de aquéllos de no ser aspiradas.

Los metales puros y limpios son apreciablemente más resistentes, dúctiles, y también más resistentes a la corrosión y tienen un mayor grado de fluidez.

Para la fusión al vacío se han desarrollado tres sistemas. De éstos se destaca el que emplea un horno eléctrico de inducción considerándolo el más adecuado para el caso en cuestión.

La fusión al vacío emplea la electricidad para la producción del calor necesario para la fusión porque este calor tiene las siguientes características:

- 1) Precisión en el control del desarrollo del calor y de su distribución
- 2) El desarrollo de calor es independiente de la naturaleza de los gases que rodean a la carga. Esta atmósfera puede seleccionarse a voluntad con relación a la naturaleza de la carga y a las acciones químicas del proceso térmico.
- 3) La temperatura máxima sólo se encuentra limitada por la naturaleza del material de la carga.

El sistema de fusión al vacío por inducción consiste en situar en el interior de una cámara de vacío, un crisol que contenga el metal a fundir. Dicho crisol se encuentra rodeado por una bobina, la cual, alimentada por una corriente eléctrica, crea a su vez corrientes inducidas en la masa del metal a fundir, provocando el necesario aumento de temperatura de éste hasta alcanzar su fusión. Este procedimiento debe efectuarse a una presión de algunas centésimas de Torr, si bien en ciertos hornos se lleva a cabo con presiones de  $10^{-5}$  y  $10^{-6}$  Torr.

El horno de inducción se emplea generalmente cuando se trabaja con pequeñas cantidades de material.

Cuando estos hornos se utilizan para la fusión de cantidades muy pequeñas (menores a 15 kg), el crisol donde se efectúa la fusión y la lingotera donde se forma el lingote o el molde con la cavidad de la pieza deseada, están situados en la misma cámara de vacío. De esta manera, una vez fundido el metal, se vacía directamente

en la lingotera o molde sin necesidad de abrir el horno y por lo tanto se efectúa la colada sin variación de presión y con un vacío constante. Este sistema no se emplea en la fusión de lingotes de mayor peso porque la cámara que contuviese el crisol y la lingotera adecuados, resultaría excesivamente grande. En el caso de requerirse la fundición de cantidades mayores, de hasta 2 y 3 toneladas, el sistema varía ligeramente, pues si bien la fusión se produce asimismo gracias a la bobina inductora que rodea el crisol, el vaciado de éste no se efectúa basculándolo, sino que su fondo va provisto de un tapóon del mismo material, que se rompe o se funde mediante otra bobina de inducción montada a este fin. Lo que interesa es que el metal fundido caiga por el fondo del crisol sobre una lingotera o molde en el que solidificará. Como existe el mismo vacío en el horno que en la lingotera o molde, la pieza conservará toda la pureza conseguida durante la fusión.

En la figura 15.3 puede verse el corte esquemático de la versión crisol y lingotera o molde encerrados en la misma cámara de vacío y en el que aquél puede girar hasta que se vacíe por completo en el molde o lingotera. La bobina inductora está constituida por un tubo de cobre, refrigerado interiormente mediante circulación de agua. Este sistema es precisamente el conveniente en el caso que nos ocupa dado que se pretende la fusión de pequeñas cantidades de metal (recordemos que el peso de los álabes es, en promedio, de 60 g )

Una de las ventajas de este tipo de horno consiste en que las corrientes inducidas, que recorren la masa del material, producen en la misma un movimiento de rotación, con lo que se consigue una buena agitación y una no menos buena desgaseificación, permitiendo obtener metales muy homogéneos principalmente en aleaciones.

Estas instalaciones eliminan los medios contaminantes constituidos por el aire y la escoria. La única fuente de impurezas lo constituye el crisol. El rendimiento registrado suele ser muy elevado.

El grupo de vacío<sup>1/</sup> para este tipo de hornos acostumbra estar formado por una bomba de paletas que trabaja en tándem con una Roots. Cuando se trata de alcanzar una presión del orden de los  $10^{-4}$  Torr, se aplica la clásica combinación de bomba difusora, bomba de paletas. Un sistema típico de alto vacío se ilustra en la figura 15.3.

Para el análisis económico, se considera que estas operaciones se efectúan haciendo uso del siguiente equipo:

---

1/ La presión de un gas en una cámara a una temperatura dada, puede reducirse dejando que el gas escape a través de una lumbrera o una bomba de vacío, o por medio de un sistema de bombeo compuesto por dos o más bombas en serie, las cuales comprimen el gas y descargan a la atmósfera, o dejando que el gas se condense en una superficie fría o que reaccione químicamente con una superficie activa colocada dentro de la cámara o en un anexo de ella.

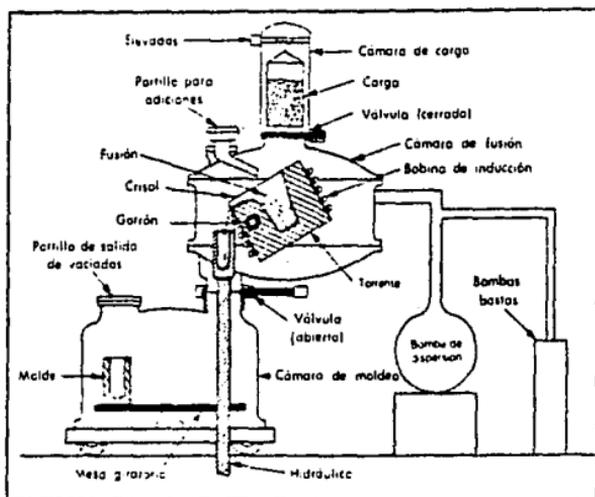
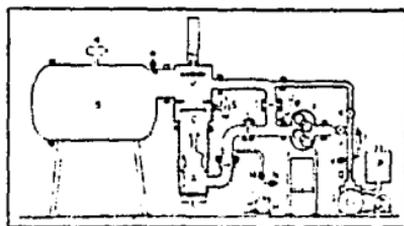


Figura 15.3. Horno de fusión al vacío por inducción



Sistema típico de alto vacío, A = bomba de difusión; B = cámara; C = deflector; D = válvula; E = calentador de la bomba; F = Soplador tipo Roots; G = bomba de refuerzo; H = bomba de retención; I a N = válvulas; P = recipiente de aceite y separador; Q = fuelles; R, S = tubo de medición de iones; T, U = tubos de medición Pirani; V, W = válvulas de entrada de aire

Un horno de inducción para 5 lb, con potencia de 15 KW, de energía eléctrica trifásica de 18 KVA; energía absorbida de 23 amp; 9.6 KHz; con cabina de controles.

Un intercambiador de calor para enfriamiento del horno, sistema agua\_agua, cabeza flotante, dos bombas para recircular agua (cada una de ellas accionada por un motor de 1/2 hp), tinaco de aproximadamente 7 000 litros, tuberías para trabajar a 60 lb/in<sup>2</sup> y tanque de 50 l para agua suavizada.

Un equipo para la inyección de argón.

Un equipo para la fusión al vacío, con bombas de 20 micrones, 160 l/min; manómetros, válvulas, tubería cubierta de acero inoxidable y forrada interiormente con refractario, puerta hermética, mirillas, dimensiones internas de la cámara de 0.60m X 1.0m X 1.0m, sistema basculante del horno.

#### 15.4. Equipo para limpieza y acabado de las piezas (1)

Los estucos\_moldes, una vez colados y fríos, deben ser desmoldeados y pasar a una operación de limpieza para eliminar cuerpos extraños adheridos a la pieza e irregularidades en la superficie. Esta operación puede consistir en una limpieza con chorro de abrasivo que consiste en lanzar a presión el abrasivo seleccionado (natu-

ral o sintético) seco o suspendido en un líquido contra la superficie de la pieza para limpiarla y darle un acabado primario. El abrasivo puede lanzarse por fuerza centrífuga o con aire comprimido y boquillas especiales. Cuando el abrasivo es arena sílica, la operación se denomina "sandblast" y requiere, para su realización, de una cabina.

Una vez que el "árbol" se encuentre limpio, debe inspeccionarse visualmente para poder separar, con corte con disco o con golpe de martillo, las piezas buenas y las que se pueden reparar. Mientras tanto, las que resultaron defectuosas, junto con las partes que actuaron como canales y bebederos, regresan a fundición. A las piezas que son aceptadas se les esmerilan las rebabas que pudieran tener, así como el material sobrante por medio de máquinas con abrasivos como pueden ser esmeriladoras de disco o de banda, escariadoras o rebabeadoras.

Para el análisis económico, se puede considerar que el equipo a emplear es:

Una cabina para limpieza de piezas tipo "sandblast", de 36'' de ancho X 36'' de fondo X 30'' de altura; motor de 3/4 hp para operar a presiones de 1 a 125 psi. Se puede emplear la misma compresora ya estimada.

Una rebabeadora, una escariadora y un esmeril de cinta abra-

siva, con potencia unitaria de 1/4 hp, pueden considerarse adecuadas y suficientes.

#### 15.5. Equipo para tratamiento térmico

La mayoría de los aceros moldeados requieren uno o varios tratamientos térmicos que permitan el obtener la microestructura del acero adecuada para las exigencias mecánicas requeridas en la pieza. Es, pues, necesario un horno para verificar esta operación.

Por las características del material con que son construidos los álabes en cuestión, es recomendable un tratamiento térmico de endurecimiento por envejecimiento o por precipitación, mediante inducción magnética.

Recordando, el tratamiento térmico es una operación o combinación de operaciones en que intervienen el calentamiento y enfriamiento, en tiempos determinados, de un metal o una aleación en estado sólido, que se efectúa con el fin de alterar las propiedades del metal. Existen numerosos tratamientos térmicos, la elección de las condiciones apropiadas (temperaturas, tiempos, etc.) en cada caso particular, dependen del metal o aleación en cuestión, de la situación inicial (procesos previos observados sobre el material) y de las propiedades que se deseen obtener.

La adición de los elementos para aleación suministra un medio para controlar las propiedades de las piezas.

En algunos casos, cuando se añade a un metal A un elemento B, aparecen nuevos cristales de B mezclados con los cristales de A; las propiedades resultantes tienden a ser un promedio entre A y B. En otros casos se forma una substancia totalmente nueva, o sea, el compuesto intermedio AB, que tiene sus propias características (en general, duro y quebradizo).

En otros, el elemento B se disuelve en el elemento A para formar la solución sólida A(B). Estas soluciones poseen las características del solvente A, modificado por la presencia del soluto B, que suele aumentar la dureza, la resistencia física, la resistencia eléctrica y la temperatura de recristalización.

El caso más interesante es el que incluye la combinación de la solución sólida A(B) y la precipitación de otro constituyente, sea B o AB, ocasionada por el tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación. Los resultados son, entre otros, aumento de resistencia y de dureza y disminución de la ductilidad. Tal tratamiento consisten en mantener el cuerpo a una temperatura elevada para provocar la precipitación de un componente de una solución sólida supersaturada. La temperatura elevada aumenta la velocidad de precipitación al acelerar el movimiento de ciertos átomos del soluto. Esta última solución puede quedar integrada si previamente se ha mantenido la aleación a una temperatura convenientemente alta durante un tiempo suficiente para permitir que uno o más de los componentes puedan pasar a la solución sólida y luego se ha enfriado con suficiente rapidez. Esto provoca un estado inestable ya que

el exceso de soluble tenderá a salir de la solución.

El calor necesario para este tratamiento térmico puede ser proporcionado por inducción.

Recordando; cuando la corriente alterna de alta frecuencia pasa por una bobina de trabajo (la cual puede ser de varios diseños, dependiendo de la superficie a calentar y de los objetivos perseguidos), se forma un campo magnético de alta frecuencia, el cual induce corrientes en el metal. El calentamiento resulta de la resistencia del metal al paso de estas corrientes.

El equipo para medición y control de temperatura en el tratamiento térmico es muy importante. El equipo para control de temperatura puede ser un pirómetro manual o termopares conectados con circuitos amplificadores, eléctricos o electrónicos, para abrir o cerrar válvulas o contactos eléctricos, para regular el paso de la corriente. En los procesos por lote, el control de la temperatura es indirecto y se hace especificando el tiempo del ciclo.

Para el análisis económico, se considera el empleo de un proceso por lote, construyendo una bobina para 30 kg de piezas aproximadamente, para alcanzar temperaturas hasta 1 000°C, y un crisol con revestimiento adecuado.

15.6. Equipo para limpieza y acabado de las piezas (2)

Después del tratamiento térmico a que las piezas son sometidas, se debe realizar una segunda operación de limpieza y acabado. En ésta es recomendable un granallado para eliminar alguna pequeña capa de descarbonización (recordando que en las piezas moldeadas suele formarse una pequeña capa de descarbonización, como se comentó a su tiempo) que puede quedar en la superficie de las piezas y para mejorar las propiedades físicas de la misma.

En la operación de granallado, sobre la superficie del metal se proyecta a gran velocidad un chorro de granalla (partículas de acero). De esta manera se somete a esfuerzo a la superficie en áreas muy pequeñas sucesivamente, más allá de la resistencia de fluencia a la tensión produciendo una deformación local permanente. En la recuperación elástica, las fibras adyacentes situadas inmediatamente debajo que no han experimentado fluencia plástica, tienden a recobrar sus dimensiones originales produciendo así tensiones residuales de compresión en la superficie deformada plásticamente. Este proceso es de trabajo en frío y, en general, mejora las propiedades mecánicas locales (resistencia y dureza). La magnitud del efecto de trabajo en frío depende principalmente del trabajo plástico que realiza la granalla, el cual, a su vez, depende del tamaño, velocidad y del número total de impactos. Esta operación requiere un gran cuidado porque puede ser excesiva y dañar la pieza provocando excesiva rugosidad o grietas. Granallando una superficie descarbonada se consigue un aumento en la resistencia, pero siempre qu

el efecto de granallado se extienda a través de la zona descarbonada en que el material es mucho más débil. El granallado puede ser preferible al recarburado de la superficie; además es de menor costo. Todavía resulta de mayor conveniencia en el caso de los álabes de aleaciones complejas, porque no debe haber ningún cambio en la composición química de la pieza en ningún grado.

Para el análisis económico, se considera que esta operación es realizada empleando una granalladora de 100 lb/ciclo, de 1 a 3 fases de operación; cada ciclo tiene una duración de 15 minutos.

Una limpieza y acabado perfectos pueden llegar a requerir el empleo, nuevamente, de las unidades de corte por medio de abrasivos ya mencionadas.

#### 15.7. Equipo para medición y control

El control de calidad de un producto industrial se efectúa midiendo dimensiones, propiedades físicas, químicas u otras características, comparándolas con determinados estándares de referencia y variando, si se requiere, el proceso productivo para controlar mejor estas características y mantenerlas dentro de rangos aceptables.

Los estándares de referencia mencionados son establecidos de acuerdo con las características deseadas en el producto y las condiciones del proceso seguido para la producción de tal producto.

La determinación de tales estándares debe ser el resultado de diversos estudios y pruebas.

La palabra "defecto", que se emplea mucho en control de calidad, se refiere a una falta de continuidad o una imperfección revelable en una característica químico\_física o dimensional de un producto o de sus componentes.

El control de calidad puede efectuarse mediante ensayos destructivos o mediante ensayos no destructivos.

Los ensayos destructivos implican la destrucción de "piezas piloto" para verificar la presencia de defectos. Esquemáticamente, estos ensayos tienen las siguientes ventajas y límites.

Ventajas : a) Con frecuencia pueden dar una medida directa y real.

b) Las medidas son cuantitativas y cualitativas y, a menudo, confrontables con dibujos de proyectos o estándares.

c) No se necesita un experto para la interpretación de pruebas.

d) El conjunto de los puntos a), b), y c) lleva a que no se suelen dar problemas entre diferentes expertos inspectores.

Límites : a) Sólo pueden efectuarse sobre muestras y es necesario demostrar que la muestra es adecuadamente representativa.

- b) Las piezas probadas no pueden ser utilizadas después
- c) Ensayos repetidos son, a menudo, imposibles y los diferentes tipos de ensayo necesitan diferentes muestras.
- d) No resulta posible efectuar un elevado número de ensayos por gran costo.
- e) No puede aplicarse sobre piezas de gran valor técnico y comercial.
- f) Los efectos acumulativos del uso no son susceptibles de investigación con facilidad.
- g) No pueden controlarse piezas durante su vida útil con facilidad.
- h) Necesitan, a menudo, un gran trabajo de maquinado de las piezas antes del ensayo.
- i) Las inversiones y el costo de la mano de obra son generalmente altos.

Los ensayos no destructivos, por su parte, son métodos por los que es posible conseguir medidas cuidadosas de características de partes o conjuntos sin alterar sus estructuras o sin mermar sus valores. Esquemáticamente, estos ensayos (que van desde el ensayo visual hasta técnicas muy sofisticadas) tienen las siguientes ventajas y límites.

Ventajas : a) Pueden efectuarse directamente durante la producción

sin disminuir el valor o limitar las características del producto.

- b) Pueden aplicarse al 100% de la producción o sólo en algunas piezas.
- c) Pueden utilizarse cuando las características a controlar son muchas y no predecibles.
- d) Se pueden hacer diversos ensayos simultáneamente o en secuencia sobre la misma pieza.
- e) Los ensayos pueden repetirse varias veces.
- f) Pueden efectuarse con piezas que trabajan sin parar.
- g) Los efectos acumulativos del uso pueden investigarse directamente.
- h) Son capaces de revelar defectos en partes de equipo durante el trabajo.
- i) No necesitan preparaciones especiales.
- j) Los equipos son a menudo portátiles.
- k) Los costos son a menudo bajos, particularmente para los ensayos repetidos sobre las mismas piezas.

- Límites :
- a) Los resultados necesitan una interpretación por expertos o técnicos especializados.
  - b) Faltando estándares, diferentes expertos pueden hacer observaciones y estar en desacuerdo entre ellos.
  - c) Las características son medidas indirectamente y, a menudo, se limitan a aspectos cualitativos.

- d) Algunas clases de ensayos no destructivos necesitan de inversiones muy grandes.

La aplicación de todos los ensayos de calidad en general, necesita una clara distinción entre los procedimientos de inspección y los objetivos a alcanzar con la inspección, los tipos de defectos a revelar, los límites de aceptación, la definición de los estándares de aceptación, y una suficiente preparación de los inspectores.

Es necesario, por lo tanto, conocer todos los tipos de defectos que pueden ser introducidos durante los procesos de fabricación para poder definir el tipo de ensayo más conveniente y el momento de su aplicación.

Las piezas fundidas se inspeccionan en cuanto a exactitud dimensional, dureza, acabado superficial, propiedades físicas y químicas, si está sana interiormente y si tiene grietas.

Para poder obtener resultados satisfactorios, es necesario el cuidadoso control de las condiciones en que cada operación se realiza, observado los estándares de producción establecidos previamente tras diversos estudios y pruebas.

Por ejemplo, para obtener piezas exactamente según el modelo diseño, es conveniente fabricar primero algunas muestras de desecho, en las cuales se determinarán las diferencias dimensionales, pudiendo así efectuar las correspondientes correcciones en la matriz.

Igualmente deben realizarse diversas corridas de probetas hasta obtener las piezas sanas y dentro de especificaciones químicas y metalográficas deseadas, para, a partir de los procesos que permitieron obtener dichas piezas, se puedan establecer los estándares.

También es conveniente el establecimiento de estándares en los procesos de los laboratorios empleados.

En una microfundición, la operación crítica es la fusión del metal, porque de la verificación adecuada de ésta dependerá la composición química de la pieza y las condiciones metalográficas de la misma. Esto implica la necesidad de un muy cuidadoso control de sus condiciones de carga y temperatura; posible mediante un eficiente laboratorio químico que permita controlar los elementos de las cargas y mediante equipo para la medición exacta de la temperatura y el tiempo.

El laboratorio químico mencionado puede observar diversas técnicas, tal como el análisis vía húmeda, la determinación de carbón y azufre, etc.

El determinar si una pieza está sana interiormente una vez terminada, es probablemente la inspección de mayor importancia en un álabe fundido<sup>1/</sup>. Para realizar esta operación se dispone, como

---

<sup>1/</sup> Es interesante comentar que si se han observado las reglas constructivas básicas de la pieza, se han considerado adecuadamente los efectos de dilatación y contracción observados en las dife-

ya se ha mencionado, de diversas pruebas destructivas y no destructivas. Estas últimas resultan ser las más adecuadas por tratarse de lotes pequeños de producción, en los que es necesaria, además, la revisión de cada pieza.

Los principales ensayos no destructivos se comparan brevemente en el cuadro 15.1.

Para la consideración económica, se estimará que se cuenta con los equipos para el control de calidad adecuados y suficientes; sean estos propios o de alguna institución de servicio especializada, los cuales representan un costo porcentual del de producción.

---

1/ rentes secuencias del proceso, se ha cumplido exactamente cada paso marcado por la metodología y cada uno de los equipos o utensilios utilizados ha recibido el mantenimiento adecuado para asegurar su confiabilidad, la exactitud dimensional obtenida no debe ser de tanta atención en la inspección como el caso de la estructura metalográfica y "salud" interior de la pieza.

**COMPARACION ENTRE LAS MAS IMPORTANTES CARACTERISTICAS DE LOS PRINCIPALES  
ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

Tipo de ensayo	Características analizadas	Defectos tipo revelables	Aplicaciones más importantes	Ventajas	Limites
Radiografía con rayos X	Variación de densidad y composición	Grietas, porosidades, inclusiones, soldadura	Forja, fundición, soldadura, ensambles	Investigaciones de defectos internos, se puede usar para muchos materiales, portátil, queda una documentación de la prueba	Costoso, prácticamente no revela defectos mayores de 0.1 mm, peligroso para la salud
Radiografía con neutrones	Composición no homogénea, sensibilidad a núcleos atómicos o particulares	Presencia, falta o equivocada distribución de componentes internos	Investigación en interiores (también de combustibles o explosivos)	Buena penetración en muchos materiales para la construcción, gran sensibilidad para los núcleos de interés, puede quedar documentación	Costoso, relativamente poco portátil, peligroso para la salud
Líquidos penetrantes	Discontinuidades en la superficie del material	Grietas, porosidades y defectos superficiales de varios tipos	Forja, fundición, soldadura, revelado de defectos después de esfuerzos de fatiga	Costo bajo, portátil, fácil de usar	El defecto debe presentarse sobre una superficie accesible, las indicaciones son a veces confusas y dependientes del inspector
Corrientes de Foucault	Variaciones en la conductividad eléctrica y permeabilidad magnética del material	Grietas, variaciones en la estructura después de tratamiento térmico	Tubos y tubería, medida de espesor, clasificación de aleaciones	Costo no muy alto, a menudo puede quedar una documentación de prueba	Se puede utilizar sólo con materiales conductores de electricidad, sensible a la geometría de la pieza, penetración poco profunda
Microondas	Variaciones en las características eléctricas en la superficie de los materiales conductores	Grietas y defectos en los materiales dieléctricos, grietas superficiales en los materiales metálicos	Vidrio y fibra de vidrio, plástico y cerámica, medida de humedad y espesor	No necesita contacto, prueba muy rápida	Ninguna penetración en los materiales, la individualización de los defectos no es muy clara
Partículas magnéticas	Variación en el flujo magnético sobre la superficie de la pieza	Grietas y otros defectos superficiales, soldaduras e inclusiones cerca de la superficie externa	Acero y fundición. Productos estruados	Sencillo, poco costoso	Se puede utilizar sólo con materiales ferromagnéticos. Necesita una buena preparación superficial, la interpretación del ensayo depende del inspector
Flujo magnético	Variación en el flujo magnético sobre la superficie de la pieza	Grietas y otros defectos superficiales, soldaduras e inclusiones cerca de la superficie externa	Acero y fundición. Productos estruados	Buena para grietas de fatiga, queda documentación de la prueba	Se puede utilizar sólo con materiales ferromagnéticos y de pequeño tamaño
Ultrasonido	Variaciones en la impedancia acústica a alta frecuencia	Grietas, agujeros, inclusiones, soldaduras	Forja, fundición, soldadura, ensamble, medida de espesor	Excelente penetración, buena sensibilidad; puede documentarse	El tiempo de inspección es muy largo, necesitan estándares de referencia y una óptima limpieza de la superficie
Sonido	Variaciones en la impedancia acústica a baja frecuencia y a las vibraciones naturales	Grietas, agujeros, soldaduras	Estructuras particulares	Portátil y sencillo de usar	No muy exacto y muy dependiente de la forma de la pieza

*(continúa)*

Tipos de ensayo	Características técnicas	Defectos que revelados	Aplicaciones más importantes	Ventajas	Limites
Holografía con ultrasonidos	Verificación en la integridad estructural a alta frecuencia	Cristales, agujeros, supelentes, inclusiones	Estructuras pequeñas y regulares	Permite obtener una imagen visible de los defectos	Muy costoso, imágenes menos exactas que las de rayos X, sólo se puede usar con piezas pequeñas
Rayos infrarrojos	Temperatura superficial, verificación en la conductividad térmica	Agujeros en los materiales no metálicos	Circuitos eléctricos y electrónicos, instalaciones de varios tipos	Permite obtener una imagen visible de la distribución de temperatura	Muy costoso y poco preciso
Estatímetros	Deformaciones mecánicas	No se usan para la investigación de defectos	Análisis de las deformaciones que se encuentran en los materiales sujetos a sollicitaciones mecánicas	Bajo costo y muy preciso	No pueden determinar deformaciones ya existentes, se aplican sobre superficies muy pequeñas
Barridos de tensión	Deformaciones mecánicas	No se usan para la investigación de defectos	Análisis de las deformaciones que se encuentran en los materiales sujetos a sollicitaciones mecánicas	Bajo costo, se obtiene la distribución de la deformación sobre toda la pieza	No pueden determinar deformaciones ya existentes
Holografía óptica	Deformaciones mecánicas	Deformaciones plásticas, discontinuidades	Piezas de alta precisión, juntas, estructuras celulares	Muy preciso, se obtiene la distribución de las deformaciones sobre toda la pieza, se puede obtener documentación de la prueba	Muy costoso y muy complejo, requiere una gran habilidad
Laslefler (Control de fugas)	Flejo de un fluido	Pérdidas en recipientes cerrados	Equipos para el vacío, tanques, tubos y tuberías	Buena sensibilidad	Necesite accesibilidad interna y externa de la instalación en prueba y puede ser costoso

Cuadro 15.1.

16. Estimación del costo de fabricación de un álabe

Supuestos:

- 1) Un estuco\_molde o "árbol" tiene 16 álaves de 60 gramos cada uno (promedio), por lo tanto, un estuco\_molde necesita un kilogramo de material\_pieza.
- 2) Se estima que para poder tener 1 kilogramo de metal\_pieza, son necesarios 2.3 kilogramos de metal\_líquido; ello por las pérdidas de metal\_líquido representadas por canales, mermas y piezas defectuosas. El cálculo de las pérdidas obedece al siguiente cálculo:

Canales de alimentación y respiraderos	: 30%
Piezas defectuosas rechazadas	: 25%
Mermas <sup>1/</sup>	: 3%

- 3) El horno de fusión tiene capacidad máxima de 2.5 kilogramos de metal\_líquido por carga, por lo que cada una de ellas equivale a un kilogramo de metal\_pieza.

De acuerdo con estos supuestos, a continuación se establecerán los costos de cada operación para 2.5 kilogramos de metal\_líquido o un kilogramo de metal\_pieza.

---

<sup>1/</sup> Material que volatilizaría por el proceso al vacío y que provocaría un aumento en la presión de vapor de los elementos constituyentes de la aleación.  
Desperdicio de material por corte de rebaba.

Estos costos, expresados en pesos mexicanos, han sido evaluados en junio de 1986. En el caso de requerirse una estimación en fecha posterior, considérese la inflación registrada en el periodo correspondiente.

Estos costos no son de ninguna manera exactos; el cálculo sólo pretende destacar el orden de magnitud de tales costos (que varían en función del volumen de producción, maquinaria y equipo empleado, etc.), a fin de establecer la conveniencia económica, representada por el ahorro del álabe, de la fabricación en México de álabes para turbinas de gas, observando el proceso de microfusión

#### 16.1. Fabricación del modelo de plástico

##### **Matriz**

Se estima que el costo de una matriz de acero especial con la impresión de la pieza deseada es de, aproximadamente<sup>1/</sup>,

\$ 850 000.00

Considerando una vida útil tal que permita 900 inyecciones de 150 gramos de plástico para con ellas conformar 180 "árboles", se tiene un costo de,

---

1/ La determinación de los costos es producto de una investigación directa.

$(\$ 850\ 000.00)/180 = \$ 4\ 723.00/\text{árbol}$

### Plástico

Estimando una relación plástico a metal de 1:5, se establecen las siguientes necesidades de plástico:

$(2.5\ \text{kg metal\_líquido}/\text{árbol}) (1\ \text{kg plástico}/5\ \text{kg metal\_líquido}) =$   
 $= 0.5\ \text{kg plástico}/\text{árbol}$

considerando pérdidas de un 40% (que incluyen los adhesivos necesarios, mermas, etc.), se tiene,

$(0.5) (1.4)\ \text{kg plástico}/\text{árbol} = 0.7\ \text{kg plástico}/\text{árbol}$

Evaluando que el kilogramo de plástico es de \$ 1 000.00,

$(\$ 1\ 000.00/\text{kg plástico}) (0.7\ \text{kg plástico}/\text{árbol}) = \$ 700.00/\text{árbol}$

### Injectora de plástico

Si se considera la inyectora de plástico de la capacidad mencionada en el apartado correspondiente, se tienen las siguientes necesidades energéticas:

Resistencia de 500 Watts = 0.5 kW

Motor eléctrico de 10 hp = (10 hp) (0.746 kW /hp) = 7.46 kW

Total = 7.96 kW

Estimando que las operaciones por "árbol" consumen 0.50 hr y que el costo por kWh es \$ 20.00,

$(7.96\ \text{kW}) (0.5\ \text{h}) (\$ 20.00/\text{kWh}) = \$ 79.60/\text{árbol}$

**Mano de obra**

Para la verificación de la inyección de plástico y ensamble de piezas para formar un "árbol", es necesario un trabajador cuyo sueldo sería de \$ 2 130.00/día de 8 horas

$$\$ 2\,130.00/8 = \$ 266.25/\text{hora}$$

En las operaciones mencionadas se estima necesidad de 30 minutos de mano de obra por árbol, con lo que el costo por este concepto quedaría,

$$\$ 133.125/\text{árbol}$$

Costo total : Fabricación modelo/árbol

$$\$ 4\,723.00 + \$ 700.00 + \$ 79.60 + \$ 133.125 = \$ 5\,635.725/\text{árbol}$$

16.2. Fabricación del molde

**Material cerámico**

Estimando una relación material cerámico a metal líquido de 0.5:1, se establecen las necesidades de lodos refractarios como sigue:

$$(2.4 \text{ kg metal líquido/árbol}) (0.5 \text{ kg lodos refractarios/kg metal líquido}) = 1.25 \text{ kg lodos refractarios/árbol}$$

Considerando un 5% de pérdidas, las exigencias serían de,

$$(1.25) (1.05) \text{ kg lodos refractarios/árbol} = 1.313 \text{ kg lodos refractarios/árbol}$$

La composición de tales lodos se establece como sigue:

Porcentaje de coloides y refractarios por kg l:

coloides : 33%

refractario : 67%

Costo unitario : \$ 750.00/l coloide

\$ 600.00/kg refractario

Costo total :  $(0.33 (\$ 750.00)/1 \text{ kg}) + (0.67 (\$ 600.00)/1 \text{ kg}) =$

$= \$ 649.50/1 \text{ kg}$

Aumentando un 40% en tal costo por concepto de introducción al país de estos insumos (debido a que su adquisición en el mercado nacional no sería posible, al menos inmediatamente), el costo quedaría,

$(\$ 649.50) (1.4)/1 \text{ kg} = \$ 909.30/1 \text{ kg}$

Expresado por árbol, se tiene,

$(1.313 \text{ kg lodos refractarios/árbol}) (\$ 909.30/1 \text{ kg}) =$

$= \$ 1 194.00/\text{árbol}$

#### **Mezcladora eléctrica de coloides**

La mezcladora descrita para esta operación tiene la siguiente necesidad de energía:

1 motor de 1 hp;  $1 \text{ hp} (0.746 \text{ kW} / \text{hp}) = 0.746 \text{ kW}$

estimando una duración de 30 minutos en la realización de cada árbol, la necesidad por esta unidad es de,

$(0.746) (0.5) \text{ kWh} = 0.373 \text{ kWh/árbol}$

con un costo de \$ 20.00/kWh, el costo por energía es:

$(\$ 20.00/\text{kWh}) (0.373 \text{ kWh/árbol}) = \$ 7.46/\text{árbol}$

#### **Cama fluidizada**

La cama fluidizada para el recubrimiento de los modelos tiene las siguientes necesidades energéticas,

1 motor de 5 hp (compresora) = 5 hp (0.746 kW/hp) = 3.73 kW

Estableciendo que la utilización de esta unidad por cada árbol es de 30 minutos, y que el costo por kWh es de \$ 20.00, se tiene,

(3.73 kW) (0.5 h)(\$ 20.00/kWh) = \$ 37.30/árbol

#### **Cuarto de secado**

Este exige el siguiente consumo de energía y costos por el siguiente concepto:

1 motor eléctrico de 1 hp

2 motores eléctricos de 0.25 hp

Total = (1.5 hp) (0.746 kW /1 hp) (0.5 h) (\$ 20.00/kWh) =  
= \$ 11.19/árbol

#### **Horno para cocido de cerámica**

El horno diesel descrito demanda el siguiente consumo energético:

- a) consumo de diesel aproximado de 17.5 l/h
- b) consumo eléctrico de 2 motores de 0.5 hp = 1 hp (0.746 kW /hp)  
= 0.746 kW
- c) consumo de material refractario :

estimando en \$ 350 000.00 el costo por cambio del revestimiento del horno para cocido de cerámica y que la unidad requiere tal cambio cada 1 500 cargas, se tiene,

\$ 350 000.00/1 500 cargas = \$ 230.00/carga

Considerando que el tiempo por árbol es de 30 minutos, y que los costos unitarios son \$ 20.00/kWh y \$ 35.00/l diesel, se tiene,

(17.5 l/h) (0.5 h) (\$ 35.00/l) = \$ 306.25

(0.746 kW) (\$ 20.00/kWh) (0.5 h) = \$ 7.46

El costo total demandado por árbol por concepto de cocción de árboles sería:

\$ 230.00 + \$ 306.25 + \$ 17.46 = \$ 544.00/árbol

#### **Mano de obra**

Para la fabricación de los moldes se requiere un obrero cuyo salario diario sería,

\$ 2 130.00/día de 8 horas = \$ 266.25/h

Estimando una operación por árbol de 30 minutos, el costo por este concepto quedaría,

\$ 133.125/árbol

#### **Costo total : Fabricación molde/árbol**

\$ 1 194.00 + \$ 7.46 + \$ 37.30 + \$ 11.19 + \$ 544.00 + \$ 133.125 =

= \$ 1 927.075/árbol

### **16.3. Fusión y colada**

#### **Material**

En México, la fabricación de aceros especiales se encuentra

limitada; las superaleaciones, de hecho, no se fabrican sino a niveles de laboratorio, sin embargo, el Instituto Mexicano de Investigaciones Siderúrgicas (con sede en Saltillo, Coahuila) ha alcanzado logros muy importantes. Esta se encuentra ya actualmente ofreciendo diversas calidades de aceros especiales a nivel comercial y servicios de producción por pedido de aleaciones requeridas por la industria nacional.

El costo de aceros de media aleación que ofrece el Instituto se sitúa, en promedio, en aproximadamente \$ 250 000.00/t; el costo de aceros inoxidables en \$ 600 000.00/t

En el caso de superaleaciones (base níquel o cobalto), mientras el Instituto puede constituirse en proveedor para la microfundición, pueden comprarse en el exterior. El costo de la superaleación INCONEL, tomada como ejemplo representativa es, aproximadamente \$ 11 000 000.00/t más 40% por introducción al país, \$ 15 400 000.00/t

En el horno de inducción propuesto para la fusión al vacío del metal, el crisol tiene capacidad para 5 lb de metal, es decir, aproximadamente 2.5 kg de metal

En éste, alcanzando temperaturas de hasta 1 650°C, las cargas de 2.5 kg funden en 8 minutos al 100% de eficiencia; sin embargo, estos hornos normalmente se operan al 70% de su eficiencia, requiriéndose, en consecuencia, 12 minutos para la fusión. Incrementando a este tiempo, el de ajuste de temperatura, el de colado al molde, el de solidificación y el de recarga del crisol con metal

para la siguiente carga, se estima que cada carga duraría, en promedio, 30 minutos.

Tomando este último material (el más costoso) como base para estimar el costo de material, para considerar situaciones extremas, se tienen,

NECESIDADES PARA 100 KG DE MATERIAL

	Materiales	Costo por kg	Costo
60.0 kg	Aleación	\$ 15 400.00	\$ 924 000.00
40.0 kg	Retorno <sup>1/</sup>	\$ 15 424.50	\$ 616 980.00
0.6 kg	Ferrosilicio <sup>2/</sup>	\$ 910.00	\$ 546.00
0.4 kg	Ferromanganeso <sup>2/</sup>	\$ 720.00	\$ 288.00
0.4 kg	Aluminio <sup>2/</sup>	\$ 910.00	\$ 364.00
80.0 kW	Electricidad <sup>3/</sup>	\$ 20.00	\$ 1 600.00
TOTAL			\$ 1 543 778.00 cada 100 kg

1/ Que constituye el material que regresa a fundición proveniente de operaciones subsecuentes por ser "desperdicio" (como canales de vaciado, bebederos, etc.) o piezas defectuosas.

2/ Adquiridas de Compañía Minera Autlán

3/ Estimación del consumo del horno de inducción para fusión y refinado como se detalla más adelante.

Costo por kilogramo de metal líquido : \$ 15 438.00

Para carga de 2.5 kg en el horno : \$ 38 595.00

Además del consumo eléctrico del horno, la operación de fusión y colada del metal exige energía auxiliar al horno:

- a) para el enfriamiento,
- b) para accionar el equipo de vacío.

El intercambiador para enfriamiento de la bobina del horno y de los capacitores de la fuente de poder, tiene 2 motores de 1/2 hp para realizar su operación; el equipo de vacío, a su vez, es accionado por medio de un motor eléctrico de 1/2 hp, lo que representa,

$1.5 \text{ hp} (0.746 \text{ kW /hp}) (0.5 \text{ h}) = 0.560 \text{ kWh}$

$(0.560 \text{ kWh}) (\$ 20.00/\text{kWh}) = \$ 11.19/\text{carga}$

El revestimiento del horno de inducción exige su cambio, aproximadamente, cada 32 cargas; el crisol requiere 1 kg de refractario de \$ 1 250.00 por kg, por lo que se estima,  
 $(\$ 1 250.00/\text{kg refractario})/(32 \text{ cargas}) = \$ 39.10/\text{carga}$

#### Mano de obra

Para esta operación es necesario un encargado de la fusión cuyo sueldo diario puede estimarse en \$ 2 421.00

El costo por mano de obra por hora sería,

\$ 2 421.00/8 horas laborables = \$ 303.00/h

En la operación por "árbol" se invierten 30 minutos, por lo que el costo por mano de obra directa sería \$ 151.50/árbol.

Costo total : Fusión y colada/árbol

\$ 38 595.00 + \$ 11.19 + \$ 39.10 + \$ 151.50 = \$ 38 796.80/árbol

16.4. Limpieza y Acabado

"Sandblast"

La primera operación de limpieza, consistente en una operación por chorro de abrasivo, exige:

a) arena

Estimando que el kilogramo de arena sílica cuesta \$ 22.00 y que el consumo por kilogramo de pieza limpia es de 1/3 de kilogramo de arena, se tienen necesidades de \$ 6.60/kg ; como cada árbol tiene 2.5 kg de metal, se considera un consumo de \$16.50/árbol.

b) energía

La operación de "sandblast" requiere el accionamiento de un motor de 3/4 hp y de un compresor de 5 hp durante 15 minutos<sup>1/</sup>, con lo que se tiene:

(5.75 hp) (0.746 kW/hp) (0.25 h)(\$ 20.00/kWh) = \$ 21.50/árbol

c) operador

---

<sup>1/</sup> La unidad es de 200 lb/ciclo; cada ciclo de 15 min

Los costos por mano de obra por esta operación se estiman como sigue:

$$(\$ 1\ 375.00/8\ h) (0.5\ h) = \$ 86.00/\text{árbol}$$

#### Corte de coladas y rebabeo

Las piezas individuales son cortadas, separadas de los desperdicios y piezas defectuosas (que regresan a fundición) y rebabeadas. Para ello se cuenta con rebabeadora, escariadora y esmeril de cinta abrasiva que, se estima, representan los siguientes costos:

##### a) energía

Accionamiento de 3 motores de 1/4 hp cada uno, para las máquinas mencionadas. Se estima que la operación por árbol consume 0.5 h

$$3 (0.75\ hp) (0.746\ kW/hp) (0.5\ h) (\$ 20.00/kWh) = \$ 16.80/\text{árbol}$$

##### b) consumo de abrasivos

Se estima un costo de \$ 11.00 por kilogramo de pieza para reposición de abrasivos. Estimando 2.5 kg por árbol,

$$\$ 11.00 (2.5) = \$ 27.50/\text{árbol}$$

##### c) mano de obra directa

Se considera que para el corte y rebabeo se requiere un operador con salario por día de 8 horas de \$ 2 342.00. Estimando 30 minutos de duración de la operación,

$$(\$ 2\ 342.00/8\ h) (0.5\ h) = \$ 144.00/\text{árbol}$$

#### Tratamiento térmico

El costo del tratamiento térmico es difícil de establecer porque está determinado por el peso de la pieza, la temperatura necesaria y el tiempo de duración de la operación.

Estimando que se cuenta con un crisol con revestimiento adecuado y una bobina de trabajo que permitan el tratamiento de aproximadamente 30 kg de piezas, en donde se verifiquen:

- 1) recocido a 1 000°C durante una hora, con consumo de 12.6 kWh
- 2) calentamiento a 750°C durante 8 horas, con consumo de  
(9.45 kW) (8 h) = 75.60 kWh
- 3) enfriamiento durante 9 horas, con consumo de  
(7.56 kW) (9 h) = 68.04 kWh

se tienen los siguientes costos:

\$ 7 000.00 por concepto de consumo de refractario por tratamiento térmico de 18 horas;

\$ 20.00 (75.60 + 12.6 + 68.04) = \$ 3 124.90

Por lo tanto, el costo total es:

\$ 7 000.00 + \$ 3 124.80 = \$ 10 124.80/30 kg piezas

En cada árbol se estima 1 kg pieza, por lo que el costo por árbol es de :

\$ 10 124.80/30 = \$ 337.50/árbol

#### Granallado

Realizar esta operación incluye el consumo de:

- a) granalla

Estimando un costo de \$ 150.00 por kg de granalla y un con-

sumo de 5% por kg de pieza limpia, se tiene un costo de \$ 7.50 por kg pieza.

b) energía

1 motor eléctrico de 3 hp y 2 de 0.5 hp, durante 15 minutos (duración del ciclo de la granalladora), representan costos por:  
4 hp (0.746 kW/hp) (0.25 h) (\$ 20.00/kWh) = \$ 15.00/kg pieza

1 motor de 0.75 hp para cinta de esmeril para acabado final durante 15 minutos,

0.75 hp (0.746 kW/hp) (0.25 h) (\$ 20.00/kWh) = \$ 2.80/kg pieza

c) mano de obra

estimando el costo por concepto de mano de obra directa, se tiene,

\$ 2 342.00/día de 8 horas laborables

(\$ 2 342.00/8 h) (0.50 h) = \$ 585.50/kg pieza

Costo total : Limpieza y acabado/árbol

\$ 16.50 + \$ 21.50 + \$ 86.00 + \$ 15.80 + \$ 27.50 + \$ 144.00 +

+ \$ 337.50 + \$ 7.50 + \$ 15.00 + \$ 2.80 + \$ 585.50 = \$ 1 260.60/árbol

Costos de fabricación totales por árbol

Modelo	\$ 5 635.80
Molde	\$ 1 927.10
Fusión y colada	\$ 38 796.80
Limpieza y acabado (incluyendo tratam. térmico)	\$ 1 260.60
TOTAL (materiales y mano de obra directa)	\$ 47 620.30
Mano de obra indirecta (45%) : manejo de material, control de calidad	\$ 21 429.14
<u>TOTAL</u>	<u>\$ 69 049.44</u>

NOTA : No se han incluido los gastos administrativos, de investigación y diseño, de comercialización, etc.

De acuerdo al supuesto de que cada árbol tiene 16 álabes de 60 gramos cada uno, el costo de fabricación de un álabe de 60 gramos es de:

\$ 4 315.60

Actualmente, en el mercado internacional, los precios de venta de algunos álabes para turbinas de gas, adquiridos actualmente por los usuarios mexicanos de los motores térmicos (véase estudio de mercado), son los siguientes:

- 1) álabes de Centauro : US dls \$ 158.00
- 2) álabes de Saturno : US dls \$ 104.00

3) álabes de G. E. : US dlrs \$ 45.00

que permiten establecer que, en promedio, el precio de venta se ubica en US dlrs \$ 102.33

Estimando un tipo de cambio 1 US dlrs = 500 pesos mexicanos, se tiene  $(102.33) (500) = 51\ 167.00$  pesos mexicanos por álabe.

El compararlo con el costo de fabricación estimado, suponiendo que éste se duplique al agregarlo los costos que faltan por evaluar, se aprecia que el costo de fabricación se fija en 6, 7 veces menor que el del mercado internacional. Así, se reporta un interesante beneficio económico, sumado al tecnológico constantemente referido.

#### **En conclusión**

La fabricación de álabes, piezas componentes de turbinas de gas que requieren reemplazo constante, para un país como México, en el que estas piezas han sido hasta ahora importadas por falta de producción interna (en calidad y cantidad adecuadas), representa algunas conveniencias económicas como:

#### **1. La reducción de importaciones**

Esto es, una menor salida de divisas, punto particularmente

importante ante la crisis económica y la escasez de éstas, por la compra de piezas que no se encuentran disponibles internamente, y que son indispensables para mantener en operación el equipo instalado. La figura 16.1 muestra la gráfica de las importaciones mexicanas de partes de turbinas de gas en el periodo 1980-1986. En ella es posible observar la magnitud del mercado nacional por este tipo de piezas.

2. La reducción del costo de reparación de las turbinas. Tal costo involucra:
  - a) el valor (precio de venta) de la pieza a reemplazar; o bien, el costo de reparar la usada;
  - b) el tiempo de entrega de la pieza a reemplazar o la rehabilitada, y que la máquina está fuera de operación, con todo lo que ello implica;
  - c) la mano de obra que interviene en la reparación.

La reducción representada por el primer punto, ha quedado manifiesto en la estimación del costo de fabricación de un álabe por el proceso de microfusión.

En relación al segundo punto, la producción nacional representaría, en teoría, un menor tiempo de entrega de los álabes solicitados (el proveedor se localizaría geográficamente más próximo), condición que permitiría el mantenimiento de inventarios más

reducidos (con lo que ello implica en relación a costos)

- Beneficios a largo plazo que se extienden a toda la industria mexicana en general y que ya se han comentado ampliamente.

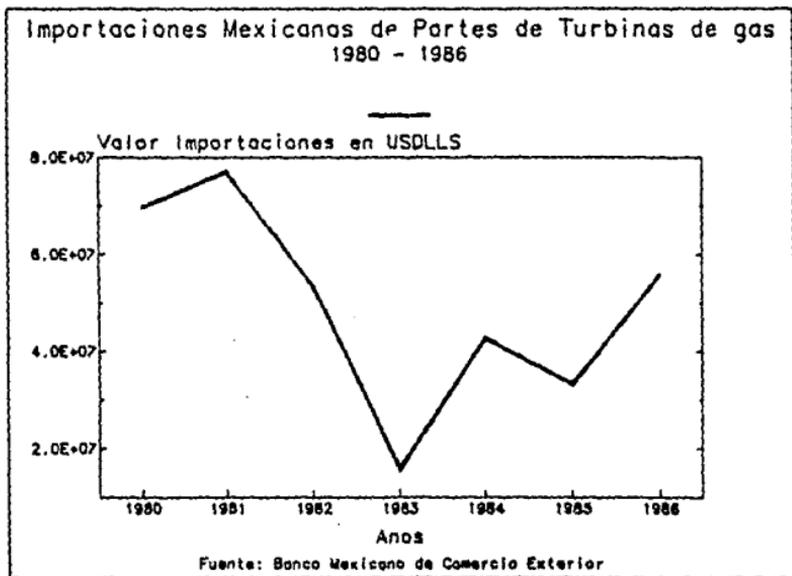


Figura 16.1.

### 17. Requisitos de instalación

La instalación de una microfundición capaz de fabricar álabes para turbinas de gas involucraría :

- 1) Un estudio de mercado que permitiera, no determinar la necesidad de los álabes, que es evidente (para proporcionar mantenimiento a las unidades existentes y buscando a un plazo mayor la fabricación integral de turbinas, indispensables en la generación de energía eléctrica y otras muchas aplicaciones industriales), sino la magnitud y características de tal demanda.
- 2) Una etapa de diseño de los álabes a producir, observando las normas ASTM para álabes de turbinas de gas. En esta etapa el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), junto con diversas instituciones educativas y de investigación, pueden proporcionar apoyo y asesoría.
- 3) Una etapa de diseño de las instalaciones industriales a partir del volumen de producción deseado. En esta etapa el Instituto de Investigaciones Siderúrgicas (IMIS), como se detalla un poco más adelante en una pequeña semblanza de este organismo, puede significarse en apoyo de importancia mayúscula.
- 4) Una etapa de instalación propiamente dicha, constituida por:

- a) adquisición del terreno
- b) construcción de la nave industrial
- c) compra e instalación del equipo básico (incluyendo pruebas de funcionamiento de todos y cada uno de tales equipos)

En esta etapa, el IMIS, también puede ser de ayuda importante.

- 5) Una etapa de pruebas en la cual se determinen los estándares de producción, se establezcan los primeros procesos productivos capaces de permitir la obtención de piezas sanas y dentro de las características dimensionales y de composición deseadas, el personal involucrado se familiarice con el proceso y los diferentes equipos. En esta etapa, el IMIS también puede constituir un apoyo decisivo.
- 6) Diferentes etapas o fases productivas en las que ya se fabriquen las piezas en forma "comercial". Se consideran varias fases porque se estima en cada una de ellas algún "crecimiento productivo", esto es,
  - a) incrementos en el volumen de producción (mediante el aumento de personal o de turnos de trabajo, mediante el aumento de equipo, etc. )
  - b) incrementos en el número de modelos (particularmente este aspecto dependerá de los éxitos conseguidos en las operaciones de diseño de los álabes que deben ser continuas y traducirse en moldes\_matrices, con la impresión de las nue-

vas piezas), y en procesos productivos establecidos.

Es interesante hacer notar que la rapidez de tales "crecimientos" dependerá, en importante medida, de la habilidad de los operarios para asimilar los procesos y resolver los diferentes problemas que pudieran presentarse.

Todas estas etapas involucran, además, tiempo y dinero; variables que representan un riesgo muy importante, pero que, insistiendo nuevamente, es necesario afrontar para poder asimilar una técnica básica de la industria moderna.

Por otra parte, es interesante destacar el hecho de que el desarrollo de un proyecto como el que se propone en este trabajo, podría constituir una conjunción de esfuerzos, particularmente de instituciones de investigación, que permitiría el desarrollo y asimilación de tecnología a un costo mínimo.

Debido a la importancia que para este trabajo representaría el Instituto Mexicano de Investigaciones Siderúrgicas, se incluye a continuación una breve semblanza de este organismo.

El Instituto Mexicano de Investigaciones Siderúrgicas (IMIS), organismo público descentralizado, creado en 1975, en funciones

desde 1977 y establecido en la Ciudad de Saltillo, Coahuila; constituye un sistema integrado de facilidades de investigación para permitir a la industria siderúrgica mexicana resolver diversos problemas, avanzar constantemente sus fronteras productivas, obtener un nivel más alto de eficiencia en la producción; todo a un costo mínimo para el país.

Este Instituto se encuentra apoyado por el Gobierno Federal, por el del Estado de Coahuila y por las empresas siderúrgicas públicas y privadas, y ha permitido el alcance de logros tecnológicos y de investigación importantes.

Los objetivos del Instituto, pueden resumirse como sigue:

- 1) Realizar investigación aplicada.
- 2) Apoyar las investigaciones que realice la industria e instituciones de investigación, con el fin de adecuar y aplicar métodos y medios de producción apropiados a la economía nacional.
- 3) Impulsar y colaborar en la preparación de las materias primas y demás insumos, de los procesos que se siguen y de los equipos que se utilizan en la industria siderúrgica para mejorar su rendimiento económico.
- 4) Investigar la tecnología de aprovechamiento de las materias primas y demás insumos, de los procesos que se siguen y de los equipos que se utilizan en la industria siderúrgica, para mejorar el rendimiento económico.

- 5) Investigar maneras de mejorar o adecuar productos existentes y destacar nuevos usos de los mismos. Evaluar la posibilidad de desarrollar materiales y productos que no se fabriquen actualmente en el país.
- 6) Promover la aplicación de los resultados de la investigación siderúrgica, tanto la que se lleva a cabo por el propio Instituto y por la industria, como la que se realice en colaboración con otras instituciones de investigación y de enseñanza superior
- 7) Propiciar la comunicación entre los departamentos de investigación de las empresas para lograr un mejor aprovechamiento de los recursos que las mismas destinen a actividades de investigación de servicios tecnológicos.
- 8) Llevar a cabo estudios e investigaciones relacionados con el desarrollo tecnológico de la industria siderúrgica, tomando en cuenta sus aspectos económicos.
- 9) Establecer un sistema de información y documentación científica y tecnológica sobre la industria siderúrgica.
- 10) Prestar la colaboración que se le solicite para los proyectos de carácter general encaminados a ampliar y modificar las instalaciones de la industria siderúrgica.
- 11) Prestar la asistencia técnica que se le solicite para los estudios e investigaciones necesarios de normalización y mejoría de las especificaciones de proceso y productos.
- 12) Brindar asesoramiento y apoyo a la industria para sus programas de sustitución de importaciones.

Para la realización satisfactoria de estos objetivos, el Instituto cuenta con la siguiente infraestructura:

- 1) Laboratorio de Metalurgia Física; en el que se pueden realizar, entre otros, análisis de fallas, fractografía, pruebas físicas, mecánicas, metalográficas; ensayos de templabilidad y tratamientos térmicos; diseño de tratamientos térmicos y cédulas de trabajo mecánico; ensayos no destructivos, etc.

Entre los apoyos que este laboratorio presta, uno de los de mayor importancia se vincula estrechamente con programas tales como sustitución de importaciones, determinación de especificaciones y aseguramiento de la calidad de piezas críticas; así como apoyo en general para la industria.

- 2) Laboratorio de Análisis Químico, en el que se analizan diversos materiales empleando técnicas como: difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, espectrometría de emisión, espectrofotometría de absorción atómica, determinador de carbón y azufre, determinador de nitrógeno y oxígeno, determinador de hidrógeno, vía húmeda, plastometría, dilatometría, calorimetría.

- 3) Laboratorio de proceso de minerales, que está equipado con aparatos para la realización de estudios de minerales en general, enfocándose principalmente hacia trabajos de investigación de las materias primas utilizadas en la industria siderúrgica a

fin de optimizar su obtención, tratamiento y empleo.

- 4) Laboratorio de procesos siderúrgicos, en el que se cuenta con equipo para la realización de pruebas y simulaciones de los procesos que se realizan en la industria siderúrgica y otras industrias, como por ejemplo, la fabricación de aceros y aleaciones especiales en los hornos de inducción y hornos al vacío (cuenta con unidades con capacidad de 25 a 100 kg).
- 5) Laboratorio de arenas para fundición, en el que se cuenta con equipo para el control de arenas en verde y en seco; a temperatura ambiente, a alta temperatura y para pruebas en el taller; efectuándose controles de rutina y controles especiales.
- 6) Laboratorio de refractarios, el cual tiene las funciones de prestar servicio de control de calidad de recepción de productos refractarios y de realizar investigación de los mecanismos de destrucción de refractarios, optimizando su tiempo de vida.
- 7) Laboratorio móvil de análisis, el cual desarrolla estudios en el campo, relacionados con: la determinación de especificaciones de los materiales, el aseguramiento de calidad, la sustitución de importaciones, la determinación de fallas de los metales, el apoyo a proyectos operativos de campo. Para el logro de los puntos anteriores, cuenta con equipo especializado, inte-

grado por los siguientes aparatos: durómetros, durómetro digital, aparato de ultrasonido para detección de fallas, yugo magnético, esmeriladora angular, aparato de pulido electrolítico (MOVIPOL), microscopio metalográfico portátil, espectrómetro de emisión multicanal, aparato de partículas magnéticas, aparato de corrientes parásitas, inspección por líquidos penetrantes, equipo de metrología.

- 8) Centro de control, instrumentación y sistemas; el cual se encarga del mantenimiento de los equipos y diversos instrumentos con los que cuenta el Instituto, realiza además análisis de cálculo y correlaciones de los procesos y tecnología, contando para ello con una unidad de cómputo estacionaria y otra móvil. Externamente, proporciona asistencia tecnológica y de investigación a la industria siderúrgica y sus afines.
- 9) Planta piloto de aceración, construida para la experimentación, desarrollo y mejora de tecnologías de productos y procesos para la industria siderúrgica y para la fabricación de cantidades pequeñas de aceros especiales que permitan la sustitución de importaciones.
- 10) Planta piloto de fundición, cuyas actividades se dirigen al desarrollo de aleaciones ferrosas y no ferrosas y a la fabricación de piezas de fundición que por su grado de dificultad o

tipo de aleación, no se elaboran en otras plantas. Para ello cuenta con equipo de moldeo y fundición adecuado, el control de la calidad se apoya en los análisis verificados por los diferentes laboratorios del Instituto.

- 11) Planta piloto de refractarios, cuyas funciones se refieren al desarrollo de paquetes tecnológicos en el área de refractarios y productos afines, al suministro de insumos para la acería piloto del Instituto y a la industria en pequeñas cantidades, al desarrollo de sustitutivos de importación en el área de refractarios para la industria de la transformación.
- 12) Centro de información, el cual proporciona material informativo especializado y de interés para la industria que sirve.
- 13) Centro de recursos humanos, el cual tiene como función la capacitación de personal para el propio Instituto y para la industria, así como la constante superación en el nivel académico y práctico de tales recursos.
- 14) Centro de ingeniería, en el que se desarrollan trabajos como: estudios, cálculos, diseño, supervisión de fabricación y puesta en marcha de equipo de producción; presta asesoría en cuanto a ingeniería básica y conceptual a todas las industrias que lo soliciten; buscando vigorizar la economía nacional, disminu-

yendo, en función de la integración, adaptación y utilización de equipos, dependencia tecnológica, etc.

De acuerdo con esta información y en relación a la unidad productiva de álabes en cuestión, el Instituto Mexicano de Investigaciones Siderúrgicas (INIS), se encuentra en facultad de prestar los siguientes servicios:

1) Asesoría en la selección de los mejores materiales a emplear; metales y refractarios en los hornos.

2) Suministro de aceros especiales.

A este respecto, el Instituto ofrece ya comercialmente aceros al carbono, al Cr\_Mo, el bajo Ni\_Cr\_Mo, al alto Ni\_Cr\_Mo e inoxidables de diversos grados. Es posible solicitar a este organismo la fabricación de alguna aleación base níquel fusible, como INCONEL, o alguna de la serie NIMONIC y mientras éste pueda suministrarlo adecuadamente, puede adquirirse el material necesario en el mercado internacional.

3) Suministro, en algún porcentaje, del material refractario necesario para el revestimiento del horno de inducción para fundición al vacío, del horno de cocido de cerámica y para tratamientos térmicos.

- 4) Asesoría en el diseño de los procesos de fundición que proporcionen las mejores piezas (sanas interiormente y con dimensiones dentro de las tolerancias permitidas), empleando para ello los análisis de los diferentes laboratorios de que dispone el Instituto.
- 5) Asistencia tecnológica en el diseño, puesta en marcha y control de los hornos de la microfundición.
- 6) Verificación de diversos análisis proporcionados por los diferentes laboratorios del organismo, incluyendo el de la unidad móvil.
- 7) Capacitación de la mano de obra requerida.

18. Estudio de mercado

Para que un producto tenga éxito (esto es, sea aceptado y consumido) en el mercado al cual se dirige, este último debe tener necesidad de tal producto (con las cualidades dimensionales, de calidad, funcionales, etc. que lo definen).

El oferente del artículo debe, en consecuencia, conocer las características de su mercado objetivo (previamente definido) como: localización, tamaño, necesidades no satisfechas, capacidad económica, gustos y preferencias, requerimientos de calidad y cantidad, etc.. Esta comunicación entre el productor y los usuarios, función del personal dedicado a la mercadotecnia, debe ser continua y a través de medios efectivos.

En el caso de álabes para turbinas de gas, en México se tiene:

La NECESIDAD de dar mantenimiento a las turbinas de gas ya instaladas para disponer adecuadamente de ellas y satisfacer la demanda energética (eléctrica, mecánica, de transporte, etc.) presente y a corto plazo, implica la NECESIDAD de álabes que sustituyan los dañados durante la operación del motor. Además, las crecientes NECESIDADES de energía implican, a su vez, la NECESIDAD de un mayor número de unidades en el mediano y largo plazo. En el caso de las turbinas de gas, esta perspectiva se muestra especial

mente importante debido a su utilización en ciclos combinados gas-vapor (tendencia muy marcada a nivel internacional) y a la posibilidad de combinar generación de energía con desalinización.

En México, la demanda de álabes para turbinas de gas de uso industrial (esto es, haciendo a un lado a las turbinas empleadas en la aviación) a emplear como refacciones durante el mantenimiento de tales máquinas, es evidente al contabilizar las turbinas instaladas, como se indica a continuación:

Recordando que los principales demandantes de turbinas de gas son Pemex y CFE, se considera representativa la muestra constituida por las unidades pertenecientes a estas empresas que es la que se incluye.

La clasificación por rango de potencia que se utiliza, obedece a la siguiente denominación :

Turbinas de gran potencia : de 47 001 hp a 469 000 hp  
(35 049 kW a 350 000 kW)

Turbinas de potencia media : de 5 001 hp a 47 000 hp  
(3 729 kW a 35 048 kW)

Turbinas de baja potencia : hasta 5 000 hp  
(3 728 kW)

Cuadro 18.1

Comisión Federal de Electricidad  
Parque de turbinas de gas. Clasificación por potencia (MW)

Marca	T. Gran Pot.		T. Media Pot.		T. Baja Pot.	
	Número unid.	Potencia unitaria	Número unid.	Potencia unitaria	Número unid.	Potencia unitaria
<b>TOTAL</b>	24		60		00	
<b>General Electric</b>	5		20			
	1	110	3	30		
	4	74	6	25		
			4	20		
			8	15		
<b>Westing_ house</b>	13		11			
	3	110	4	30		
	4	95	1	20		
	6	65	6	15		
<b>Brown Boveri</b>	3		13			
	3	65	2	30		
			1	25		
			10	15		
<b>Mitsu_ bishi</b>			7			
			7	15		
<b>Fiat</b>			4			
			2	30		
			2	15		
<b>Pratt &amp; W.</b>	3					
	3	50				
<b>Hitachi</b>			3			
			3	20		
<b>John Brown</b>			2			
			2	30		

Cuadro 18.2

Comisión Federal de Electricidad  
Parque de turbinas de gas. Clasificación por modelos

Marca	Modelo	Pot. Unit. (MW)	Cantidad	Total
<b>TOTAL</b>				<b>84</b>
<b>General Electric</b>	MS 7001	110	1	25
	MS 7001	74	4	
	MS 6001	30	2	
	MS 6001	25	6	
	MS 5001	20	4	
	MS 3001	15	8	
<b>Westinghouse</b>	W 501 D	110	3	24
	W 501 D	95	4	
	W 501 D	65	6	
	W 251/TG 20	30	4	
	MW 191/TG 16	20	1	
	MW 191/TG 16	15	6	
<b>Brown Boveri</b>	Type 11	65	3	16
	Type 9	30	2	
	Type 9	25	1	
	Type 11 L	15	10	
<b>Mitsubishi</b>	MW 191/TG 16	15	7	7
<b>Fiat</b>	W 251/TG 20	30	2	4
	MW 191/TG 16	15	2	
<b>Pratt &amp; W.</b>	C3 F	50	3	3
<b>Hitachi</b>	MS 5001	20	3	3
<b>John Brown</b>	MS 6001	30	2	2

Cuadro 18.3

Petróleos Mexicanos  
Parque de turbinas de gas. Clasificación por potencia  
(hp)

Marca	T. Gran Pot.		T. Media Pot.		T. Baja Pot.	
	Número Unid.	Potencia unitaria	Número unid.	Potencia unitaria	Número unid.	Potencia unitaria
TOTAL	00		91		596	
General Electric			57			
			2	6 500		
			22	20 000		
			28	30 000		
			3	32 000		
			2	40 000		
Solar					388	
					364	1 250
					124	4 000
Ruston					177	
					4	1 500
					45	1 750
					6	4 000
					122	5 000
Ingersoll Rand			14		13	
			14	29 000	13	4 300
Coberra			12		6	
			4	18 000	6	1 250
			6	20 000		
			2	30 000		
Kongsberg Natco					9	
					9	1 750
Hispano Suiza			8			
			3	7 000		
			5	7 000		
Allison					3	
					3	4 300

Cuadro 18.4

Petróleos Mexicanos

Parque de turbinas de gas. Clasificación por modelos

Marca	Modelo	Pot. Unit. (hp)	Cantidad	Total
TOTAL				687
General Electric	MS 1002	6 500	2	57
	LM 2500	30 000	28	
	MS 5001	20 000	22	
	MS 5002	32 000	3	
	MS 6001	40 000	2	
Solar	Saturno	1 250	264	388
	Centauro	4 000	124	
Ruston	TA 1500	1 500	4	177
	TA 1750	1 750	45	
	TB 4000	4 000	5	
	TB 5000	5 000	122	
Ingersoll Rand	GT 22	4 300	13	27
	GT 61	29 000	14	
Coberra	30	1 250	6	18
	2348	18 000	4	
	2556	20 000	6	
	6056	30 000	2	
Kongsberg Natco	KG 2	1 750	9	9
Hispano Suiza	1202	7 000	3	8
	1203	7 000	5	
Allison	501 KB	4 300	3	3

Cuadro 18.5

Turbinas de gas

Clasificación por marca y país de procedencia

País y Marca	Número de unidades	% en total de unidades
TOTAL	771	100.00
Estados Unidos :	529	68.61
Solar	388	
General Electric	82	
Ingersoll Rand	27	
Westinghouse	24	
Allison	3	
John Brown	2	
Pratt & Whitney	3	
Gran Bretaña :	195	25.29
Ruston	177	
Coberra	18	
Suiza :	16	2.08
Brown Boveri	16	
Japón :	10	1.30
Mitsubishi	7	
Hitachi	3	
Francia :	8	1.04
Hispano Suiza	8	
Italia :	4	0.52
Fiat	4	
Noruega :	9	1.17
Kongsberg Natco	9	

Cuadro 18.6

Turbinas de gas  
Clasificación por rango de potencia, usuario, marca

Rango de potencia	Marca	Usuario	Número unid.	% marca total rango potencia
Turbinas Gran Potencia :			24	100.00
	General Electric	CFE	5	20.83
	Westinghouse	CFE	13	54.17
	Brown Boveri	CFE	3	12.50
	Pratt & Whitney	CFE	3	12.50
Turbinas Media potencia			151	100.00
	General Electric		77	50.99
		CFE	20	
		Pemex	57	
	Westinghouse	CFE	11	7.28
	Brown Boveri	CFE	13	8.61
	Mitsubishi	CFE	7	4.64
	Fiat	CFE	4	2.65
	Hitachi	CFE	3	1.99
	John Brown	CFE	2	1.32
	Ingersoll Rand	Pemex	14	9.27

... (continúa)

	Coberra	Pemex	12	7.95
	Hispano			
	Suiza	Pemex	8	5.30
Turbinas				
Baja Po_				
tencia			596	100.00
	Solar	Pemex	388	65.10
	Ruston	Pemex	177	29.70
	Ingersoll			
	Rand	Pemex	13	2.18
	Coberra	Pemex	6	1.01
	Kongsberg			
	Natco	Pemex	9	1.51
	Allison	Pemex	3	0.50

---

## Comentarios

### Clasificación por marcas

El total de turbinas de gas (771 unidades), por marcas y países de procedencia se muestran en el cuadro 18.5.

Es interesante destacar la importante participación de marcas provenientes de EUA (7 marcas y 529 unidades, representando el 68.61% del total)

### Clasificación por rango de potencia y usuarios

Esta se muestra en el cuadro 18.6 y de éste es posible destacar lo siguiente:

- 1) Turbinas de gran potencia (de 47 001 a 469 000 hp)

En este rango se tienen un total de 24 unidades, todas ellas pertenecientes a CFE. De éstas, 17 son de ciclo combinado. El 54.27% del total, por otra parte, son de la firma Westinghouse.

- 2) Turbinas de mediana potencia (de 5 001 hp a 47 000 hp)

El total de turbinas de gas de mediana potencia es de 151. Presentan las siguientes características:

- a) Participan 10 diferentes marcas, de las que sobresalen las norteamericanas (General Electric, John Brown, Westinghouse e Ingersoll Rand) con 104 unidades (68.87% del total de unidades de este rango de potencia)

- b) Pemex concentra el 60.26% (91 unidades) y CFE el 39.74% (60 unidades) del total de unidades de mediana potencia.

3) Turbinas de baja potencia (hasta 5 000 hp)

Las turbinas de gas de baja potencia son 596 y presentan las siguientes características:

- a) El único usuario en este rango de potencia es Pemex
- b) El 67.79% (404 unidades) del total de estas turbinas son de procedencia norteamericana.
- c) Las marcas Solar (EUA) y Ruston (Inglaterra) abarcan el 65.10% y 29.70% del total de unidades de este rango de potencia, respectivamente.

De acuerdo con la información anterior y a manera de resumen se tiene :

Turbinas de gas

Potencia	Unidades	%
TOTAL	771	100.00
Baja (hasta 5 000 hp)	596	77.30
Media (de 5 001 a 47 000 hp)	151	19.58
Gran ( de 47 001 a 469 000 hp)	24	3.12

Potencia	Usuarios					
	Pemex (unid)	Partic. en tot. (%)	CFE (unid)	Partic. en tot. (%)	Total (unid)	Partic. en tot. (%)
TOTAL	687	89.11	84	10.89	771	100.00
Baja	596	77.31	..	.....	596	77.30
Media	91	11.80	60	7.78	151	19.58
Gran	..	.....	24	3.11	24	3.12

Todas las turbinas contabilizadas necesitan de un mantenimiento constante (como ya se ha explicado). Este consiste, en importante medida, en la sustitución de las partes dañadas durante la operación del motor. De éstas, las que representan mayor trabajo en una base rutinaria son los álabes (tanto fijos como móviles) de la turbina, componentes sometidos a las condiciones de temperatura y esfuerzo más severas. Son reemplazados constantemente buscando prevenir fallas debidas a roturas de estas piezas, de las que depende, en alto grado, la operación eficiente del motor.

A partir de la información relativa a los modelos y capacidades de las turbinas de gas industriales instaladas, es posible establecer las necesidades de álabes para el necesario mantenimiento anual de tales unidades, como se muestra en los cuadros 18.7 y 18.8.

La consideración del porcentaje de reemplazo anual responde a promedios estimados por los fabricantes y usuarios.

Cuadro 18.7

Comisión Federal de Electricidad  
Necesidad anual de álabes para turbinas de gas

Tipo	Unid.	Pasos	Alabes por paso		Total álabes	
			Rotor	Estator	Instal.	Reemplazo anual (30%)
TOTAL	84				63 620	19 086
110 MW	4	6	90	80	4 080	1 224
95 MW	4	6	90	80	4 080	1 224
74 MW	4	6	90	80	4 080	1 224
65 MW	9	6	90	80	9 180	2 754
50 MW	3	5	85	75	2 400	720
30 MW	12	5	85	75	9 600	2 880
25 MW	7	5	85	75	5 600	1 680
20 MW	8	4	80	70	4 800	1 440
15 MW	33	4	80	70	19 800	5 940

Cuadro 18.8

Petróleos Mexicanos

Necesidad anual de álabes para turbinas de gas

Tipo	Unid.	Pasos	Alabes por paso		Total álabes	
			Rotor	Estator	Instal.	Reemplazo anual (30%)
TOTAL	687				294 600	88 380
40 000 hp	2	5	85	75	1 600	480
32 000 hp	3	5	85	75	2 400	720
30 000 hp	30	5	85	75	24 000	7 200
29 000 hp	14	4	85	75	8 960	2 688
20 000 hp	28	4	80	70	16 800	5 040
18 000 hp	4	4	80	70	2 400	720
7 000 hp	8	4	80	70	4 800	1 440
6 500 hp	2	4	80	70	1 200	360
5 000 hp	122	4	80	64	70 272	21 082
4 300 hp	16	4	80	64	2 368	710
4 000 hp	130	4	75	62	71 240	21 372
1 750 hp	54	3	50	40	14 580	4 374
1 500 hp	4	3	50	40	1 080	324
1 250 hp	270	3	50	40	72 900	21 870

En consecuencia, las necesidades anuales de álabes (fijos y móviles) para turbinas de gas es de, considerando un reemplazo anual del 30%, 107 466 álabes.

El equipo mencionado a instalar en una microfundición, permitiría, aproximadamente, con la capacidad de producción estimada, la cobertura del 50% de la demanda total :

16 álabes cada 30 minutos,

32 álabes cada hora,

Jornada efectiva de trabajo de 7 horas al día,

320 días laborables al año,

71 680 álabes por año,

suponiendo un porcentaje de 25% de piezas defectuosas

Sobre otros aspectos del mercado de álabes para turbinas de gas se puede comentar lo siguiente:

- 1) Se considera que la demanda de álabes no se ve afectada en medida importante por la variación en el precio de los mismos. Ello porque es indispensable adquirir tales refacciones para atender las necesidades de mantenimiento de las unidades instaladas, las cuales, a su vez, satisfacen las necesidades energéticas.

Es interesante comentar que en tiempos de crisis económica, algunos usuarios de turbinas, si la demanda de energía (mecánica o eléctrica) proporcionada por las turbinas lo permite, recurren a la práctica de mantener fuera de servicio algunas unidades que requieran refacciones mientras pueden disponerse de ellas; sin embargo, la demanda por las piezas de reemplazo no puede detenerse. La escasez de divisas en México para la compra de refacciones en la época de crisis actual, aumenta la conveniencia de la fabricación nacional de álabes para atender la demanda interna.

- 2) Existen en México talleres dedicados a la reparación de turbomaquinaria térmica en general; a saber,

Tecnología Turbogas

Turbogas y Componentes

Turborreactores (turbinas de gas de aviones, exclusivamente)

Industrias Reed

Chromizing

Turboservices

Turbomaquinaria, S.A. C.V.

Sin embargo, su operación (rectificaciones y balanceos principalmente) es aún un poco artesanal y no incluye (con excepción de la última) la fabricación de álabes. Las piezas de repuesto necesarias son adquiridas en el mercado internacional. En efecto, Turbomaquinaria S.A. C.V. tiene capacidad instalada para

la manufactura de álabes, no obstante, éstos son para turbinas de vapor.

- 3) La fabricación de álabes para turbinas de gas es aún más recomendable para México en virtud de la política actual de la mayoría de los fabricantes internacionales de estos motores y de otras refaccionarias en relación a la venta de piezas de reemplazo. Esta venta es "por paquetes de mantenimiento" en el que incluyen el número de piezas que ellos estiman necesarias para mantener en operación sus turbinas. Ello obliga a los usuarios a sostener grandes inventarios de refacciones (con los elevados costos que esto implica).

Ante la información relativa al mercado de álabes para turbinas de gas, la propuesta de la fabricación nacional de estas piezas se ve fuertemente apoyada.

Bibliografía

Burghardt, M. David; Ingeniería Termodinámica; Editorial Harla, México, 1984

Torre Cursach, Juan M. de la; Metales y Aleaciones para Elevadas Temperaturas; Editorial Montecorvo, Madrid, 1964

Schneider, Günther; Motores Térmicos, Motores de Pistón y Turbinas de gas; Manual del Ingeniero Técnico; Ediciones URMO, Bilbao, 1973

Timings, R. L.; Tecnología Mecánica, Procesos y Materiales, Representaciones y Servicios de Ingeniería; México, 1985

Timings, R. L.; Tecnología de la Fabricación (volumen 1 y volumen 2; Representaciones y Servicios de Ingeniería; México, 1985

Van Wylen, Gordon J.; Sonntag, Richard E.; Fundamentos de Termodinámica, Editorial Limusa, México, 1980

Streeter, Víctor L.; Wylie, E. Benjamín; Mecánica de los Fluidos; Editorial Mc Graw Hill, México, 1975

Severns, W. H.; Degler, H. E.; Miles, J. C.; La Producción de Energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases; Editorial Reverte; México, 1980

Holman, J. P.; Termodinámica; Editorial Mc Graw Hill, México, 1975

Haywood, R. W.; Analysis of Engineering Cycles; Pergamon Press Ltd.; Glasgow, 1967

Flinn, Richard A.; Trojan, Paul K.; Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones; Editorial Mc Graw Hill, Bogotá, 1979

I Mech E Conference Publications 1984 3; Computational Methods in Turbomachinery; The Institution of Mechanical Engineers by Mechanical Engineering Publications Limited; London, 1984

Baumeister, Th.; Avallone E.; Baumeister, Th.; Marks, Manual del Ingeniero Mecánico; Editorial Mc Graw Hill, USA, 1978

Krekeler, K. A.; Microfundición, fundición con modelo perdido; Editorial Gustavo Gili; Barcelona, 1971

P. Egea Gil; Obtención y aplicaciones industriales del vacío; Editorial Gustavo Gili; Barcelona, 1973

Vivier Lucien, Turbinas de vapor y de gas: Teoría, construcción y empleo; Bilbao, 1968

ASME Handbook; Metals Engineering Processes; Editorial Mc Graw Hill; Nueva York, 1958

SME; Manufacturing Planning and Estimating Handbook; Editorial Mc Graw Hill; USA, 1953

American Gas Assoc.; Manual de Turbinas de Gas; Cía. Editorial Continental; México, 1967

Jennings, Burgess H.; Rogers, Willard L.; Gas Turbine Analysis and Practice; Mc Graw Hill Book Company Inc.; New York, 1953

Ferry, Jonn H.; Manual del Ingeniero Químico

Doyle, Lawrence E.; Procesos de Manufactura y Materiales para Ingenieros

Francis; El Combustible y su Tecnología

Polo Encinas, Manuel; Turbomáquinas de Fluido Compresible

Polo Encinas, Manuel; Energéticos y Desarrollo Tecnológico; Editorial Limusa, México, 1985

Lockey, J.; The Thermodynamics of Fluids; Heinemann Educational Books Ltk., London, 1966

Granet, Irning; Thermodynamics and Heat Power; Reston Pub.; Reston, Virginia, 1974

Modell, Michael; Reid, Robert C.; Thermodynamics and its aplicaciones Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1974

Stoddola, A.; Steam and Gas Turbine (volumen 1 y volumen 2); Editorial Mc Graw Hill; Nueva York, 1945

Thermique Generale; Editorial MIR, Moscú, 1968

Sawyer's Turbomachinery Maintenance Handbook; Turbomachinery International Publications; USA, 1980

Fontana, Mars G.; Greene, Norbert D.; Corrosion Engineering; International Student Edition; Singapore, 1978

Kazanas, H. C.; Baker, Glenn E.; Gregor, Thomas; Procesos Básicos de Manufactura; Mc Graw Hill, México, 1983

Kotler, Philip; Dirección de Mercadotecnia (Análisis, Planeación y Control); Editorial Diana; México, 1984

Vaughn, Richard C.; Introducción a la Ingeniería Industrial; Editorial Reverté; España, 1981

REVISTAS :

Gas Turbine World  
Power Engineering  
International Power System  
Turbomachinery International  
Siderurgia Latinoamericana  
Gas Turbine World Handbook  
Publicaciones de : Brown Boveri  
Hitachi  
General Electric

DEL ARCHIVO PERSONAL DEL DR. ING. BERTOGLI :

Impianti Nucleari; Università di Roma; Italia, 1980

Proyecto Conjunto Nafin/ONUUDI, México, La Pailería en 1984; Nacional Financiera; México, 1984

Proyecto Conjunto Nafin/ONUUDI; Los Bienes de Capital en la Situación Económica Presente; Nacional Financiera; México, 1985

G. Vidossich; La turbina de gas, protagonista hoy y en el futuro; Conferencia FIAT TTG; Argentina, 1980

IPN, ONUUDI, NAFINSA; Perfil industrial para la instalación de una planta productora de turbomaquinaria; México, 1980

NAFINSA, ONUUDI; Proceso de producción de aceros especiales; México, 1981

Machine Design, Materiales especiales; 1982

NAFINSA, ONUUDI; Descripción de las principales partes de la turbina de vapor y su fabricación; México, 1982

Estimate of Demand of Turbine Equipment; Public Power Generation in Mexico, 1981

ONUUDI, Forecast Demand of Gas Turbine in Mexico 1983 1990

Turbinas Hispano Suiza, 1982

Publicaciones de : Westinghouse  
FIAT ITG  
Sulzer  
Solar