



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz

“Diseño y construcción de una turbina mediante elementos
remanufacturados que genere trabajo útil.”

**Trabajo de Graduación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico
Automotriz**

AUTOR:
GUSTAVO EDUARDO PEÑA TORRES

DIRECTOR:
ING. HERNÁN VITERI CERDA

CUENCA – ECUADOR
2008

DEDICATORIA

A mi hija, Camila, regalo de Dios y verdadera razón de mi vida. A mi abuelo, Medardo, modelo único e insuperable, lumbrera y mentor de mis anhelos. A mi tía Lissy, mi mejor amiga y compañera. A mi madre, Ana María, quien con su desinteresado esfuerzo me ha guiado con su amor por el sendero del bien que junto a la memoria siempre viva de mi Padre son el motivo de mi felicidad. Por último a mi mujer, mi esposa, la que me ha demostrado que el amor existe, y que cuando se desea algo con pasión todo es posible; te quiero mucho María José.

Gustavo E. Peña Torres

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos mis maestros, quienes con gran dedicación han sabido brindarme todos sus conocimientos con el afán de prepararme en mi futura carrera; a toda mi familia, que me ha brindado su apoyo y amistad durante mi trayectoria estudiantil.

RESUMEN

El presente proyecto consiste en la fabricación de una turbina mediante componentes comunes y de fácil acceso en nuestro medio, que acoplados de una manera específica resulten en un motor de funcionamiento automático. De esta manera los resultados aportaran y expresaran datos que contengan tanto errores como fracasos considerando que es un mecanismo experimental pero que a la postre resultarán positivos. Siendo un trabajo que nadie a realizado anteriormente solo se poseen fundamentos teóricos y generales que se transformaran a continuación en resultados prácticos demostrativos nada más y susceptibles a análisis más profundos.

ABSTRACT

The present project consist in the fabrication of a turbine using common components that are easy to obtain in our media, coupled in a specifically way that results in an engine with automatic functioning. In this way this research will aportt and express ideas in an experimental facts records source, including mistakes, failures and achivements. Being an idea that has not been prepared before it just have theorical and general fundaments that will be transformed next to practical and demonstrative results not more, and susceptible to further analysis.

.

INDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Índice de contenidos.....	vi
Índice de Anexos.....	viii

INTRODUCCION.....	1
-------------------	---

CAPITULO 1: MOTORES.- ENERGÍA Y MOVIMIENTO

1.1. Principios de conservación.....	3
1.2 Primicias.....	4
1.3 Energía térmica.....	5
1.4 Máquinas endotérmicas.....	6
1.4.1 Principios de funcionamiento.....	6
1.4.2 Compresión de la mezcla de aire y combustible.....	8
1.4.3 Ciclos de un motor.....	9
1.4.4 Sistemas auxiliares.....	9
1.4.4.1 Sistemas de alimentación.....	10
1.4.4.2 Sistemas de admisión y escape.....	10
1.4.4.3 Sistemas de lubricación.....	11
1.4.4.4 Sistemas de refrigeración.....	12
1.4.4.5 Sistemas de regulación.....	13
1.5 Combustibles.....	13
1.5.1 Propiedades de los combustibles.....	13
1.5.1.1 Propiedades físicas de los combustibles gaseosos.....	13
1.5.1.2 Propiedades químicas de los combustibles gaseosos.....	14
1.5.2 Gas licuado de petróleo.....	14
1.5.2.1 Composición y propiedades.....	15

CAPITULO 2: TURBINAS Y TURBOCOMPRESORES

2.1 Turbinas.....	17
2.1.1 Funcionamiento.....	18
2.1.2 Construcción de turbinas.....	19
2.1.2.1 Álabes, fabricación y materiales utilizados.....	21
2.1.2.2 Cámaras de combustión.....	21
2.1.2.3 Regulación.....	23
2.2 Turbocompresores.....	23
2.2.1 Características.....	24
2.2.2 Constitución del eje del turbo.....	26
2.2.3 Temperaturas y materiales.....	28

2.2.4 Estudio del compresor.....	30
2.2.5 Estudio de la turbina.....	31
2.2.5.1 Turbinas de acción y de reacción.....	32
2.2.5.2 Acoplamiento compresor/turbina.....	33
2.2.5.3 Otros factores.....	34

CAPITULO 3: DISEÑO

3.1 Condiciones Termodinámicas iniciales.....	36
3.1.1 Ciclo Brayton.....	37
3.1.2 Aplicaciones iniciales.....	39
3.1.2.1 Dimensiones.....	39
3.1.2.2 Velocidad de entrada a compresión.....	41

CAPITULO 4: SISTEMAS AUXILIARES

4.1 Sistema de encendido.....	50
4.1.1 Señal de entrada.....	51
4.1.2 Temporizador 555.....	51
4.2 Sistema de lubricación.....	55
4.3 Sistema de arranque.....	56

CAPITULO 5: CONSTRUCCIÓN

5.1 Montaje General.....	58
5.1.1 Cámara de combustión y encendido.....	59
5.1.2 Circuito de alimentación.....	60
5.2 Pruebas preliminares.....	61
5.2.1 Primera prueba.....	61
5.2.2 Segunda prueba.....	62
5.2.3 Tercera prueba.....	64
5.2.4 Cuarta prueba.....	65

CONCLUSIONES.....	67
-------------------	----

BIBLIOGRAFIA.....	68
-------------------	----

ANEXOS.....	71
-------------	----

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1.- Propiedades generales del G.L.P.....	71
Anexo 2.- Propiedades del aire a bajas presiones.....	72
Anexo 3.- Valores de la constante de los gases perfectos.....	73
Anexo 4.- Propiedades de fluidos de trabajo y gases de proceso típicos.....	74
Anexo 5.- Factores de conversión de energía.....	75
Anexo 6.- Reacciones de combustión generales de gases y productos resultantes.....	76
Anexo 7.- Composición del aire atmosférico.....	77

Peña Torres Gustavo Eduardo

Trabajo de Graduación

Ing. Hernán Viteri Cerda

Julio 2008

**“Diseño y construcción de una turbina mediante elementos
remanufacturados que genere trabajo útil.”**

INTRODUCCION

Inquietudes relacionadas con la energía siempre han sido parte de nuestro mundo, puesto que es obviamente indudable su presencia en nuestra vida cotidiana. Siempre se ha preguntado cosas de tan simple solución como el consumo de gasolina de los automóviles: Depende de la distancia recorrida?, de la fuerza que tenga el motor?, de la velocidad con que se mueve?

La experiencia enseña que existen ciertas fuerzas en la naturaleza que tienen una propiedad que involucra movimiento, que se evalúa con variables como gravedad y trabajo y que es posible asociar con un concepto de energía. Está presente desde el movimiento planetario hasta la electricidad, desde los resortes elásticos hasta el peso y movimiento potencial gravitacional, es parte de nuestra vida, en las transformaciones químicas e intercambio intercelular que permiten las reacciones y estímulos de la vida de las especies.

Una de las características más notables de nuestra civilización es que se ha aprendido a analizar, controlar y aprovechar con gran habilidad los procesos en el Universo en términos de energía. Por esta razón, el concepto de la energía es quizá el más

importante en la física y en las ciencias Naturales en general. Así, el concepto de la energía es empleado para precisar nuestra capacidad para producir alimentos, operar nuestros sistemas de transportes, lograr ciertas comodidades en nuestras vidas. Igualmente, los procesos que ocurren en los seres vivos los expresamos cuantitativamente en términos de los intercambios de energía que ocurren en dichos procesos.

La manipulación cuidadosa de la energía ha pasado a ser un requerimiento esencial en el esfuerzo de la humanidad por sobrevivir y desarrollarse. Pero el uso de la energía depende de dos factores principales: la disponibilidad de recursos de energía, es decir de sistemas cuya energía puede determinar procesos útiles; y la disponibilidad de tecnología, es decir, del conocimiento para aprovechar dichos procesos, especialmente sin deteriorar el medio ambiente.

Pero en este caso, el propósito de exponer los principios evolutivos de las máquinas de combustión, y en particular sus bases de funcionamiento, obligan a presentar en forma progresiva los hechos y teorías resultado de investigaciones anteriores que directamente involucran a la energía en un proceso de intercambio que resulte en la construcción y funcionamiento de una turbina resultado de este proyecto.

CAPÍTULO I MOTORES.- ENERGIA Y MOVIMIENTO

1.1 Principios de conservación

Estos procesos en otro grupo de conceptos, son términos de energía y trabajo. El movimiento de un cuerpo se expresa por su energía.

Se puede transferir energía entre un sistema y su entorno de dos maneras: mediante el trabajo realizado por (o sobre) el sistema, el cual requiere un desplazamiento macroscópico del punto de aplicación de una fuerza (o presión), y por medio de una transferencia de calor, la cual se produce a través de choques moleculares aleatorios. Cada una de ellas representa un cambio de energía del sistema y, por consiguiente, normalmente produce cambios susceptibles de medición en las variables macroscópicas del sistema, como, por ejemplo, la presión, la temperatura y el volumen de un gas.

Con el propósito de expresar estas ideas de un modo más cuantitativo se puede suponer por ejemplo, un sistema que experimenta cambio de un estado inicial a un estado final. Durante este cambio, **Q** positivo es el calor transferido al sistema, y **W** positivo es el trabajo realizado por el sistema. Así, el sistema es un gas cuya presión y volumen cambian de **P_i** y **V_i** a **P_f** y **V_f**. Si se mide la cantidad **Q – W** para diversas trayectorias que conectan los estados de equilibrio inicial y final (es decir para diversos procesos), se encuentra que es la misma para todas las trayectorias que conectan los estados inicial y final. Concluimos que la cantidad **Q – W** está determinada en su totalidad por los estados inicial y final del sistema, y se le denomina el **cambio de energía interna del sistema**. Aunque tanto Q como W dependen de la trayectoria, Q – W es **independiente** de la misma. Si representamos la función de energía interna con la letra **U**, entonces el cambio de energía interna se puede expresar como

$$\Delta U = U_f - U_i = Q - W \quad (1.1)$$

Donde todas las cantidades deben tener las mismas unidades de energía. La ecuación 1.1 se conoce como la primera ley de la termodinámica, y se aplica de manera universal a todos los sistemas. Así:

ΔU = Variación de energía interna (J)

U_f = energía interna final (J)

U_i = energía interna inicial (J)

Q = Calor (J)

W = Trabajo (J)

1.2 Primicias

- La energía total de dos cuerpos que interactúan, es la suma de las energías de cada partícula, de la energía de operación entre ellas y de la energía que resulta de su acción con otros cuerpos ajenos al sistema.
- Todos los cuerpos, sólidos, líquidos o gaseosos, poseen cierta energía cinética debida a las partículas que los componen, aunque el cuerpo en conjunto se encuentre en reposo respecto al observador.
- La expansión libre de un gas constituye una ilustración de un proceso de relación entre trabajo de fuerzas internas y energía interna de un cuerpo, que ocurre en un sistema aislado, es decir, un sistema que no está sometido a acciones externas.

De estos conceptos, se infiere que cuando un sistema está sometido solo a sus fuerzas internas, es decir cuando está aislado o no interactúa con el exterior, los procesos que ocurren en el sistema solo producen intercambios de energía cinética y energía potencial entre sus átomos o moléculas, sin alterar la energía total del sistema. Así, enunciando el principio de conservación de la energía sería el siguiente:

“En todo sistema aislado, los únicos procesos que pueden ocurrir son aquellos en los que la energía interna del sistema permanece constante”.

De esta manera, todo trabajo realizado por una máquina térmica al someter una sustancia a un proceso cíclico, es decir sin variación de energía interna ($\Delta U = 0$) es

$$W = Q_c - Q_f \quad (1.2)$$

Q_c = Calor absorbido (J)

Q_f = Calor expulsado (J)

1.3 Energía Térmica

Los procesos que el hombre produce o estimula como consecuencia del desarrollo tecnológico, son notablemente en su mayoría los que pretenden producir movimiento de un cuerpo, de un líquido o de un gas, es decir transformar la energía que posee un sistema en otro que involucre un momentum. Para mover un automóvil o un avión, lo que necesitamos es que dichos cuerpos se muevan en cierta dirección y con cierta velocidad, por lo que las partes del motor, émbolos o paletas también tienen que moverse en cierta forma. Esto se consigue haciendo que las moléculas de los gases que resultan de la combustión del petróleo, gasolina, gas u otro, choquen con dichas partes móviles, empujándolas en una dirección determinada.

Esto involucra entonces una transformación de energía térmica en cinética, es decir, el movimiento de moléculas por combustión, debe convertirse en movimiento giratorio que puede transformarse en traslación, o movimiento de electrones o en cualquier aplicación a que se destine.

Así, se definirán dos tipos de energía que serán objeto de un profundo análisis y que son dependientes del funcionamiento de una turbina: la energía térmica o movimiento de moléculas, y la energía cinética o giro con velocidad de partículas con una distancia de rotación.

1.4 Máquinas endotérmicas

Los términos endotermia significan, quemado interno, por lo tanto, todo motor de combustión interna es un motor endotérmico. Este motor es, fundamentalmente un recipiente en el que introducimos una mezcla de aire y combustible para hacer que se quemara dentro de él. La mezcla se expande con rapidez al quemarse y ejerce una presión hacia fuera. Esta presión puede aprovecharse para mover una parte del motor, transformado así en movimiento la energía liberada por la combustión.

Así, un motor es un dispositivo que convierte energía calórica o térmica en fuerza mecánica útil o movimiento. ,

1.4.1 Principios de funcionamiento

Para constituir un motor se requieren ciertos elementos. Los principales operantes de su funcionamiento son el aire, combustible y combustión, que son los que producen la energía térmica requerida en el proceso.

El aire se necesita para suministrar el oxígeno necesario para quemar el combustible. Pero el aire tiene también otras dos propiedades que afectan al funcionamiento del motor:

- 1.- El aire es comprimible, un metro cúbico de aire se puede reducir a un litro o menos.
- 2.- El aire se calienta al comprimirlo. Las moléculas producen calor por efecto de la fricción.

Por esta razón es necesario analizar las propiedades de un gas de masa m confinado en un recipiente con un volumen V , una presión P y una temperatura T . Un gas de este tipo se aproxima a lo que se conoce como un gas ideal. La mayor parte de los gases a temperatura ambiente y presión atmosférica se comportan como si fuesen gases ideales. Es conveniente expresar la cantidad de gas que hay en un volumen dado en términos del número de moles, que puede ser expresada de la siguiente forma:

$$n = \frac{m}{M} \quad (1.3)$$

n = Número de moles (mol - Recuérdese que un mol de cualquier sustancia es la masa de la sustancia que contiene el número de Avogadro, 6.022×10^{23} de moléculas)

m = Masa (kg)

M = Masa molar (kg/mol)

Ahora como en este caso este gas ideal estará confinado en un recipiente cilíndrico modificable con la subida del émbolo, entonces la masa o el número de moles permanece constante. Respecto a un sistema de este tipo, los experimentos aportan la información siguiente. Primero, cuando el gas se mantiene a temperatura constante, su presión es inversamente proporcional al volumen (ley de Boyle). Segundo, cuando se mantiene constante la presión del gas, el volumen es directamente proporcional a la temperatura (ley de Charles y Gay-Lussac). Estas observaciones se resumen en la siguiente ecuación de estado de un gas ideal:

$$PV = nRT \quad (1.4)$$

P = presión (kPa)

V = Volumen (m^3)

n = Número de moles (mol)

R = Constante de los gases perfectos ($J/g \cdot mol \cdot ^\circ K$)

T = Temperatura ($^\circ K$)

Los experimentos realizados con varios gases muestran que a medida que la temperatura se aproxima a cero, la cantidad PV/nT se acerca al mismo valor de R para todos los gases. Por esta razón a R se le conoce como la constante universal de los gases. En el sistema SI, en el que la presión se expresa en pascuales y el volumen en metros cúbicos, el producto PV tiene unidades de newton-metro, o joules, y el valor de R es

$$R = 8.31 \text{ J/g} \cdot \text{mol} \cdot ^\circ K = 0.0821 \text{ l} \cdot \text{atm/mol} \cdot ^\circ K \quad (1.5)$$

El combustible tiene que mezclarse fácilmente con el aire y quemarse bien. En el presente caso nos ocuparemos del Gas licuado de petróleo o G.L.P., ya que es un combustible que se quema bien y aunque en estado gaseoso, su facilidad de vaporización

permite un mejor contacto de cada partícula con suficiente cantidad de oxígeno para quemarse totalmente.

La combustión es un proceso en donde el oxígeno del aire se combina con el combustible. Lo que importa es la rapidez con que se produce esta combinación, ya que tiene que ser explosiva para aprovechar toda la energía calórica liberada.

En el aire atmosférico en calma, el G.L.P. arde perezosamente. Ello es debido a que el aire solo se pone en contacto con la superficie del combustible. Para acelerar la combustión se pueden hacer dos cosas: calentar y vaporizar el combustible. Sin embargo, una combustión explosiva demasiado rápida y potente podría destruir el motor por tener lugar dentro de una cámara cerrada.

La velocidad de combustión se puede variar modificando alguno de los siguientes factores: el grado de compresión de la mezcla, la riqueza en combustible de la mezcla y la volatilidad del combustible.

1.4.2 Compresión de la mezcla de aire y combustible

Los motores más comunes usados actualmente utilizan gasolina, funcionan mejor con mezclas formadas por quince partes de aire y una de combustible.

Pero una turbina no cumple específicamente este requerimiento, sino que el mismo dependerá de su forma, materiales, tipo y otros factores que dependen del combustible utilizado. El presente caso estudiará estos procesos y los aplicará de forma experimental tratando de conseguir los mejores parámetros de funcionamiento que permitan construir un motor endotérmico de fabricación propia.

Así, las partes que se mezclaran en el prototipo, expresadas lógicamente en peso y no en volumen, determinaran el grado de compresión que tenga que brindar a la mezcla para obtener la proporción correcta.

1.4.3 Ciclos de un motor

Usualmente un motor endotérmico requiere de etapas o ciclos que ocurran sucesivamente de cierta forma. Una cámara, llamada de combustión, se tiene que llenar con la mezcla de combustible que vendrá comprimida, esta tendrá que inflamarse mediante algún tipo de ignición, desarrollando potencia por su expansión, y los gases quemados tienen que ser evacuados del interior del cilindro.

Empleando la terminología técnica, estos tiempos sucesivos se llaman: Admisión, compresión, explosión y escape. Para obtener potencia del motor esta sucesión de tiempos se tiene que repetir incesantemente. La serie completa de tiempos se llama ciclo del motor.

El tiempo de admisión comienza cuando el motor de alguna forma succiona aire del medioambiente y lo dirige hacia su interior mezclándolo con el combustible. La compresión se da cuando esta mezcla es forzada a reducir su volumen en la cámara que iniciará la explosión con una ignición o encendido de la misma. Finalmente aprovechando al máximo la fuerza de expansión de gases dado en la explosión, el escape se da cuando se evacuan los gases quemados fuera del motor, para iniciar nuevamente la admisión y un nuevo ciclo.

1.4.4 Sistemas auxiliares

De esta forma resulta indudable para el funcionamiento básico de cualquier motor, el uso de otros sistemas que le faciliten su trabajo. Al involucrar procesos termodinámicos en esta actividad, es necesario el auxilio de un sistema de alimentación de combustible,

uno de admisión y escape, uno de lubricación, de refrigeración y en ciertos casos de regulación.

1.4.4.1 Sistemas de alimentación

El combustible debe ser suministrado limpio y bien dosificado a la admisión de combustible del motor. En este sistema se debe poder almacenar el combustible y debe estar dotado de dispositivos que aseguren la alimentación del motor con combustible.

Los sistemas de alimentación para gas natural, también suministran combustible al motor. Sin embargo, el gas natural se evapora a temperaturas muy bajas, por lo que el depósito para este combustible tiene que estar herméticamente cerrado con objeto de impedir que se escape el gas. Este depósito aprovecha la presión existente del gas para obviar la bomba, por lo que solamente utiliza una válvula de paso y otra limitadoras de presión, además de filtros que retengan la suciedad y la humedad. La carburación en este caso es mucho más sencillo pues el combustible llega ya vaporizado, por lo que su función única es la de dosificar el gas y mezclarlo, cosa que resulta muy simple con el uso de venturis, surtidores o inyectores directamente acoplados a la cámara de combustión.

1.4.4.2 Sistemas de admisión y escape

El sistema de admisión suministra al motor aire limpio en la cantidad y a la temperatura apropiada para una buena combustión. Este consta de purificadores, opcionalmente un sobrealimentador, colectores, toberas de carburador y válvulas.

Los purificadores de aire retienen el polvo y la suciedad al ser atravesados por el aire aspirado por el motor. Se emplean también en ciertos casos pre-purificadores con el fin de separar las partículas más gruesas que podrían obstruir el purificador.

Los sobrealimentadores o compresores se suelen utilizar en motores pequeños para forzar la entrada de aire y expulsar más eficazmente los gases quemados, ya sea por necesidad o por incrementar llenado y potencia. En el caso de las turbinas, el compresor resulta ser solidario con el motor, por lo que resulta una bomba anexa que aumenta la presión de ingreso de aire.

El colector de admisión es una tubería que lleva la mezcla hacia el motor y el carburador mezcla el aire con el combustible en la proporción correcta y regula la velocidad del motor; a la vez, las válvulas permiten o no el ingreso de aire y combustible según se requiera.

El sistema de escape recoge los gases quemados y los manda a la atmósfera. En realidad cumple tres funciones: disipar el calor de los gases, amortiguar el ruido de las explosiones y conducir al exterior los gases quemados y sin quemar. Este consta de tres componentes fundamentales, válvulas, colector y silenciador.

Las válvulas se abren para dejar salir los gases en cierto tipo de motores, el colector recibe los gases para enviarlos al silenciador, que amortigua el ruido producido por las explosiones de la mezcla.

1.4.4.3 Sistemas de Lubricación

En un motor, este sistema realiza funciones como: reducir la fricción entre las piezas en movimiento, absorber y disipar el calor, hermetizar el cierre de holguras, lavar las piezas, reducir el ruidoso funcionamiento del motor.

El aceite del sistema de lubricación realiza todas estas funciones a la vez. Sin aceite, el motor no tardaría en desgastarse, sobrecalentarse e inmovilizarse. En efecto, además de reducir la fricción al formar una película entre las piezas en movimiento, el aceite absorbe y disipa el calor de estas mismas piezas.

El sistema de lubricación puede funcionar por salpicado del aceite sobre las piezas en movimiento o, forzando el paso de este, a presión por canalizaciones practicadas en el interior de dichas piezas. En ciertos casos se emplean ambos métodos del motor.

De igual manera, el sistema requiere de un depósito donde se almacene y enfríe el aceite, con orificios de ventilación para que no aumente la presión dentro de él por los gases que consiguen escaparse del aceite caliente. En los motores actuales, estos gases se reconducen al sistema de admisión para reducir la contaminación.

1.4.4.4 Sistema de Refrigeración

Sus funciones son: impedir que el motor se sobrecaliente o rebase temperaturas que exponga a sus partes a fallas de resistencia y, mantener la temperatura optima para su funcionamiento.

El sobrecalentamiento de un motor puede averiar sus piezas más vitales en muy poco tiempo. Para una combustión completa de la mezcla se necesita que el motor alcance una determinada temperatura pues la térmica de los procesos está calculada bajo parámetros específicos. Pero ocurre que durante el funcionamiento del motor, este produce mucho más calor del necesario. El sistema de refrigeración se encarga de disipar el exceso de calor.

La regulación de temperatura mantiene este calor en el punto necesario para una buena combustión de la mezcla durante el funcionamiento del motor. Después de arrancar el motor frío, este tiene que calentarse lo más rápidamente posible. Luego durante las operaciones máximas, el motor debe enfriarse normalmente.

Se pueden emplear dos tipos de refrigeración: por aire y por refrigerante. La primera se emplea en motores pequeños y en motores de aviación, utilizando pantallas, túneles, ventiladores e incluso el medio ambiente relativamente. La segunda emplea usualmente

agua y anticongelantes como manto alrededor del motor. El calor del mismo sea cual fuere el método, será irradiado hacia el medioambiente.

1.4.4.5 Sistemas de regulación

Ocasionalmente es óptimo mantener al motor funcionando a un número de revoluciones constante, debido a su aplicación particular. Un regulador es un instrumento que varía la cantidad de mezcla suministrada al motor, según la carga. La velocidad de régimen del motor se fija por medios mecánicos, neumáticos, hidráulicos, eléctricos u otros, según el objeto de su aplicación

1.5 Combustibles

Los requerimientos volumétricos y dimensionales de cualquier Máquina de combustión interna pueden ir directamente relacionados con las capacidades y características del combustible que se use en dicha máquina.

1.5.1 Propiedades de los combustibles

Los combustibles son sustancias orgánicas utilizadas exclusiva o principalmente para la producción de calor útil. Pueden dividirse en las tres clases naturales, combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. El presente proyecto involucra únicamente a los combustibles gaseosos.

1.5.1.1 Propiedades físicas de combustibles gaseosos

a) Viscosidad absoluta: Esta es la fuerza requerida para desplazar una superficie plana de 1 cm² de superficie sobre otra superficie plana paralela situada a 1 cm de distancia a una velocidad de 1 cm/s, cuando ambas superficies están sumergidas en el fluido. Esta fuerza se denomina poise, y con frecuencia se emplea la unidad más pequeña, el centi poise (cp. o cps).

b) Viscosidad cinemática: Esta es la relación entre la viscosidad absoluta y la densidad, medidas ambas a la misma temperatura. La unidad de viscosidad cinemática es el stoke (St).

1.5.1.2 Propiedades químicas de combustibles gaseosos

a. Número de octano: Es el porcentaje en volumen de di-octano en una mezcla di-octano/n-heptano, con la misma tendencia a la detonación que el combustible. La adición de pequeñas cantidades de plomo tetra etilo a las gasolinas eleva notablemente sus valores antidetonantes. Algunas gasolinas responden mejor que otras.

b. Poder calorífico: Es el calor desprendido por la combustión de la cantidad unitaria de combustible (Peso para combustibles sólidos, peso o volumen para líquidos y volumen para gaseosos)

c. Poder calorífico superior: Es el calor desprendido cuando todos los productos de la combustión se enfrían a la temperatura ambiente. Este incluye el calor sensible y el calor latente de evaporación del agua contenida en los productos de la combustión.

d. Poder calorífico inferior: Es el poder calorífico superior, menos los calores sensible y latente del agua de los productos de la combustión cuando se enfrían.

1.5.2 Gas Licuado de petróleo

El metano, etano, propano, butano y gases de refinería pueden emplearse individual o colectivamente para el enriquecimiento de gases a fin de hacerlos adecuados para su empleo como gas de ciudad.

Todos ellos son demasiado ricos para su empleo aislado con los quemadores normales, y su alta densidad relativa limita la proporción en que pueden utilizarse para el enriquecimiento. Mediante la transformación, craqueado u oxidación parcial, pueden hacerse más adecuados para su utilización como gases de ciudad.

1.5.2.1 Composición y propiedades

- 1.- El butano líquido comercial se compone principalmente de hidrocarburos C4 saturados e insaturados, con menos de 20% de C3 y menos de 2% de C5.
- 2.- El propano comercial consiste principalmente en hidrocarburos C3, propano y propileno si se obtiene a partir de gases de refinería, con menos de 5% de hidrocarburos C2 y menos de 10% de hidrocarburos C4.
- 3.- Las especificaciones de estos gases generalmente incluyen límites de presión de vapor, residuos pesados y azufre total.

En el Anexo 1 pueden apreciarse características generales del G.L.P. o Gas licuado de petróleo, que pueden ser útiles para cualquier análisis.

Estos gases constituyen excelentes combustibles en aparatos de combustión adecuadamente proyectados. Son limpios, fáciles de controlar, dan altas temperaturas de llama, y su movilidad les hace adecuados para muchas aplicaciones, desde aparatos domésticos de calefacción, hasta hornos o calderas industriales para cocción o encendido, incluso para utilización en motores endotérmicos como fuente alternativa de combustible. Debido a su elevado poder calorífico y densidad, a las altas proporciones de aire requeridas para la combustión, su menor velocidad de llama y límites de inflamabilidad más estrechos, pueden emplearse en aparatos proyectados para utilización en ciudad por los siguientes aspectos:

- Debido a la mayor presión del recipiente, el G.L.P. es más adecuado para uso industrial.

- A elevadas velocidades de combustión, puede presentarse el fenómeno de congelación de válvulas
- Las aplicaciones como combustible incluyen todos los tipos de hornos y el empleo con oxígeno.
- El gas es un combustible excelente para motores de explosión. Su número de octano es superior a 100, no produce dilución el cárter y forma escaso carbono.

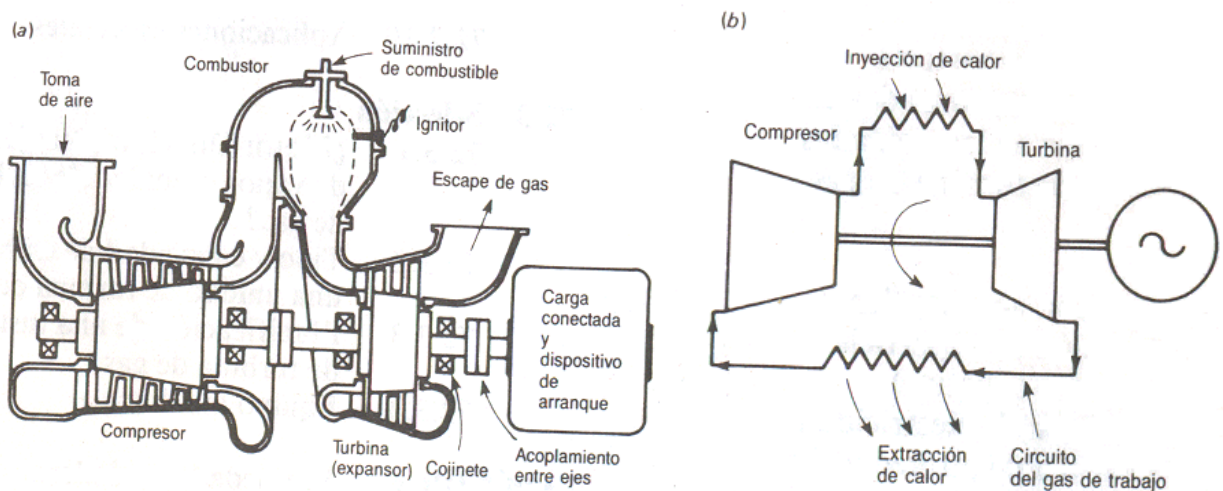
CAPÍTULO II

TURBINAS Y TURBOCOMPRESORES

2.1 Turbinas

Las turbinas son motores formados a base de ruedas en las que una fuerza externa aplicada en su zona tangencial, produce un movimiento de giro de las mismas que se transforma en trabajo útil sobre su eje de rotación.

Turbomotor: a) de ciclo abierto (combustión interna); b) de ciclo cerrado (calentamiento externo)
(esquemático)
Figura 2.1



Fuente: LUCINI, M., "Turbomáquinas de vapor y de gas"

Una turbina debe cumplir las siguientes condiciones:

- Deben permitir el aprovechamiento de la fuerza de empuje de ser posible bajo cualquier condición de variación de sus características.

- El aprovechamiento ha de efectuarse con rendimiento elevado, aunque las condiciones de la fuerza sean variables
- El eje podrá disponerse horizontal o verticalmente, según lo exija el acoplamiento directo a las transmisiones de salida
- La velocidad angular debe ser lo más alta posible para conseguir de este modo transmisiones mucho más ligeras
- Deben poderse regular bien, a fin de que sean tan adecuados como cualquier otro motor.

2.1.1 Funcionamiento

La simple ignición de un combustible en un fuego abierto produce calor que se disipa. La transferencia de la energía térmica liberada a una máquina o aparato motor se logra mediante el uso apropiado de un fluido operante, con frecuencia aire, que opera o circula a través del motor en un ciclo termodinámico de aspiración o admisión, compresión, calentamiento, expansión y escape. En un motor turbinario el gas de trabajo circula continuamente a través de elementos sucesivos en los que se efectúa un proceso en cada uno.

Un compresor rotatorio actúa como un inyector que impulsa el gas de trabajo hacia el sistema de calentamiento. Dicho gas se calienta en un proceso de combustión interna (ignición de un aporte controlado de combustible en el flujo de aire). La turbina actúa como una rueda de viento impulsada por una corriente de gas caliente en expansión que mueve el compresor.

El uso de un fluido comprimible o gas permite la absorción o cesión de cantidades considerables de energía. En una turbina la energía se libera conforme el gas actúa sobre sus álabes o aspas en movimiento; por otra parte, los álabes del compresor agregan energía al gas que se admite. El contenido de energía del gas en cualquier momento es básicamente la energía cinética de sus moléculas, que es proporcional a la temperatura del gas. La acción y el movimiento de los álabes, al cambiar la velocidad de flujo,

también alteran la velocidad y energía molecular media, así como la temperatura y presión de gas.

La combustión interna en la unidad motriz de turbina de gas es un proceso continuo que ocurre a presión constante. Un aporte constante de combustible y aire se mezcla y se quema a medida que fluye por una zona de flama o llama. La flama no toca su recipiente y es estabilizada por el patrón de flujo de entrada, que también enfría las paredes del recipiente. Pueden quemarse mezclas con un intervalo muy amplio de relaciones combustible-aire mientras en la zona de la llama la concentración normal de la mezcla se conserva con la entrada de combustible. A la vez cualquier exceso de aire se mezcla corriente debajo de la flama. El proceso de combustión requiere un control altamente desarrollado de la estabilidad de la flama.

El volumen de la cámara de combustión es muy pequeño para la intensidad de liberación de calor, debido en parte a que la combustión ocurre a altas presiones. La capacidad de trabajo de una turbina debe adaptarse cuidadosamente al tamaño del compresor que acciona.

En su más sencilla forma, una turbina consta de tres elementos: el compresor, la cámara de combustión y la turbina de gas.

2.1.2 Construcción de Turbinas

Las turbinas de gas se diferencian de las turbinas de vapor:

- Por las presiones de los fluidos utilizables, mucho más bajas.
- Por las temperaturas, sensiblemente más elevadas.

El primer punto es favorable para la construcción, las paredes son más delgadas y las piezas menos pesadas, por tanto:

- Hay mayor facilidad de realización
- Disminuye el precio para materiales idénticos
- Hay limitación de las tensiones térmicas transitorias, por tanto, hay posibilidades de una rápida subida de la temperatura, cualidad que es particularmente apreciada para los grupos de punta.

Debido a las temperaturas utilizadas, los aceros débilmente aleados al cromo, molibdeno, vanadio o los aceros inoxidable de las turbinas de vapor no son suficientes siempre; para algunos elementos es necesario utilizar aleaciones refractarias que tienen un campo más extenso de resistencia. Este ejemplo mencionado de materiales no deja de presentar algunos inconvenientes más o menos marcados según el material considerado:

- Coeficiente de dilatación de las aleaciones austeníticas superior al de las aleaciones ferríticas, lo que hace más delicado el montaje de las piezas constituidas respectivamente por cada uno de los dos materiales; así los pies de las aletas de acero austenítico se colocan en sus alojamientos con una holgura muy apreciable en frío.
- Coeficiente de conductibilidad más bajo, que junto a un coeficiente de dilatación más elevado, produce el aumento de las tensiones térmicas proporcionales a la relación entre el coeficiente de dilatación y el de conductibilidad.
- Dificultades de forjado y de soldadura de las piezas de dimensiones grandes, en particular imposibilidad de obtener rotores macizos análogos a los de las turbinas de vapor.
- Precio extremadamente alto, tanto debido a los elementos constituyentes como a las dificultades de elaboración, lo que prohíbe el empleo de tonelajes demasiado importantes.

2.1.2.1 Álabes, procedimientos de fabricación y materiales utilizados.

Los álabes fijos se construyen por forja y soldadura de palastro o por fundición de precisión de cera perdida. Una vez construido el molde un calentamiento previo permite verter cera por el orificio de colada, después una cocción asegura la rigidez definitiva y el calentamiento del molde antes de la colada para permitir una buena realización de las partes delgadas. Después de la colada y de la solidificación del metal se rompe el molde. Así se obtiene piezas que no precisan de otro acabado que el rebarbado de las entradas de colada y una limpieza de las superficies.

Las aleaciones coladas a cera perdida tienen en general una estructura basta debido a las velocidades de enfriamiento muy lentas, favoreciendo dicha estructura la formación de fisuras debidas a los choques térmicos. El procedimiento de vaciado en coquilla cerámica atenúa este inconveniente; mientras que el molde clásico es macizo, el molde caparazón solo tiene unos milímetros de espesor por lo que se enfría rápidamente y el grano es más refinado. También se pueden realizar núcleos cerámicos delgados y resistentes para la fabricación de álabes profundos.

Durante largo tiempo los álabes móviles se forjaban exclusivamente, pero como algunas aleaciones refractarias tienen un intervalo de temperatura de forma reducido, se recurre también a la colada a cera perdida.

2.1.2.2 Cámaras de combustión

Para que la combustión sea completa se debe efectuar con un ligero exceso de aire muy inferior a las cantidades necesarias para llevar los gases de combustión a la temperatura de admisión de la turbina, de ahí la distinción de dos fases en el funcionamiento de la cámara de combustión:

- Combustión con exceso de aire moderado
- Mezcla

El quemador situado en el centro de la parte superior de la cámara, asegura la pulverización del combustible, este se alimenta por radiación de la llama y sobre todo de las paredes que están a una temperatura suficiente del orden de 1000°C , se vaporiza y arde. El aire primario se distribuye en remolino alrededor del quemador, este movimiento de rotación asegura en la parte central una velocidad de flujo reducido y produce además corrientes de retorno que facilitan la combustión.

El aire de mezcla no se debe inyectar demasiado pronto a fin de dejar que la combustión tenga el tiempo necesario para efectuarse completamente. Por tanto, la mezcla tiene lugar en la parte inferior de la cámara, debiendo asegurarse una penetración adecuada del aire en el interior de la masa de los gases de combustión, disponiendo cierto número de chorros perpendiculares a las paredes.

Es necesario refrigerar las paredes de la cámara, para ello se utilizan dos métodos:

- Circulación del aire por el exterior
- Movimiento de una película de aire frío contra las caras interiores, también se dispone de una película de aire alrededor del quemador.

Así tenemos constituida la cámara de combustión por dos elementos:

- Un armazón exterior que resiste las presiones de los gases y que puede ser de acero ferrítico
- Un armazón interior sometido a temperaturas elevadas que, al menos en su parte superior, se debe construir de acero austenítico o de material refractario.

La sustentación del armazón interior debe permitir evidentemente la libertad de las dilataciones.

2.1.2.3 Regulación

El mecanismo de regulación actúa modificando el caudal del combustible inyectado. Si el grupo funciona a velocidad constante, el caudal de aire que circula en la instalación permanece invariable y a cada valor de la carga corresponde una temperatura determinada de los gases de entrada de la turbina. En la marcha a velocidad variable el caudal de aire es proporcional a la velocidad de rotación y se puede efectuar la variación del caudal de combustible de modo que se mantenga constante la temperatura a la entrada de la turbina. Sin embargo, una regulación a temperatura constante solo puede mantener un punto de funcionamiento estable si la pendiente de la característica potencia receptora-velocidad es mayor que la de la característica potencia motriz-velocidad, a temperatura constante, en el punto de funcionamiento.

2.2 Turbocompresores

El turbocompresor, al que también se le suele dar el nombre abreviado de “turbo”, tiene un principio de funcionamiento sencillo. Cuando, después de la combustión de un motor, los gases calientes residuales de la misma alcanzan velocidades muy apreciables y se encuentran con el paso obturado por los álabes de una turbina de fácil giro, a la que tienen que voltear para encontrar el camino de salida. Esta turbina es solidaria de un eje a cuyo extremo se halla un compresor centrífugo que gira, por lo tanto, al mismo número de vueltas que lo hace la turbina. En su giro, el compresor recoge el aire de la atmósfera a través de un conducto y lo pasa hacia el motor con una sobrepresión.

En realidad un turbo es una máquina así de simple. Sin embargo es necesario hacer sobre lo dicho ciertas consideraciones que nos van a dar una idea de las severas condiciones de funcionamiento de un turbo. Por ejemplo su velocidad de giro ha de ser muy elevada y hemos de encontrarla entre las 80000 a 120000 r/min según el tamaño de la máquina, lo que representa entre 1300 a 2000 revoluciones por segundo. Pero además

tiene que soportar las altas temperaturas de los gases de escape que pueden ser de unos 1023.15°K . Por todo ello se deben dar en los turbocompresores algunas de las siguientes garantías.

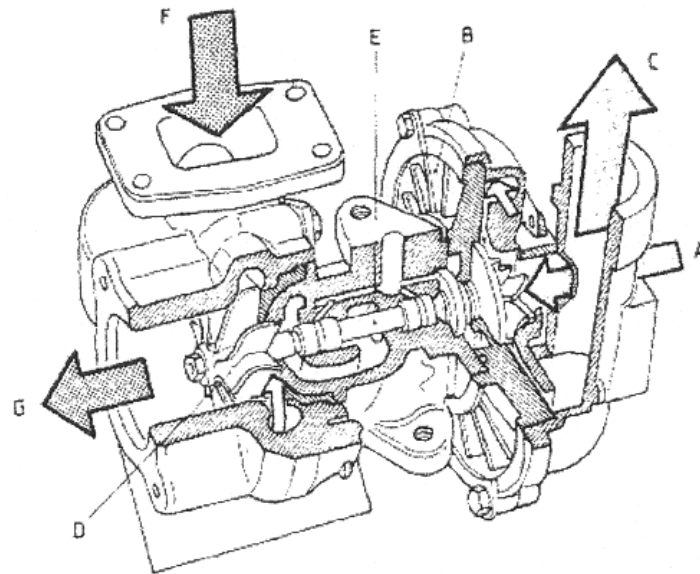
En primer lugar un diseño muy acertado de los componentes en el que se atienda a un engrase muy activo para poder soportar las vertiginosas velocidades de giro y que actúe como refrigerante que reduzca las altas temperaturas que todo aparato va acumulando al contacto con los calientes gases de escape. En segundo lugar se necesitara utilizar materiales muy seleccionados y especiales y, por último, una tecnología muy específica sobre este tipo de construcciones, razones por las cuales estos aparatos tienen un tan elevado precio y encarecen tanto el costo de los motores sobrealimentados.

2.2.1 Características

El turbocompresor pertenece a la familia de los compresores centrífugos y su funcionamiento en líneas muy generales ya lo conocemos por haberlo descrito anteriormente. Ahora conviene que nos aproximemos a esta Máquina soplante. Comencemos por ver, en la figura 2.2, el conjunto de un turbocompresor. El dibujo, seccionado, muestra la constitución interna de la Máquina y en él pueden verse las principales partes que componen su interior. Los gases procedentes del colector de escape entran en el turbo por A y se ven forzados a imprimir su giro a la turbina B, condición indispensable para que puedan salir al exterior a través del tubo de escape, cosa que realizan por la salida señalada en la flecha C.

Sección de un turbocompresor
 A-Entrada de gases de escape, B-Salida e impulso de gases de escape, C-Salida de gases, D-Compresor,
 E-Eje común, F-Entrada de aire, G-Salida de aire

Figura 2.2



Fuente: LUCINI, M., "Turbomáquinas de vapor y de gas"

Como puede verse, la turbina B es solidaria del rodete del compresor D gracias a un eje común E que une ambas piezas. Este rodete del compresor aspira el aire por F y con un valor adicional sobre el de la presión atmosférica, lo lanza por G.

Ha requerido muchos años de estudio e investigación obtener un mecanismo como este ya que ha sido necesario coordinar el diseño del compresor para que ofrezca valores de presión que se adapten en todo momento a las diferentes condiciones del régimen de giro y a la par un favorable diseño de sus palas, así como de los conductos por los que el aire ha de ser lanzado. Conviene pues, que estudiemos con un poco de atención la constitución de esta parte del turbo por la importancia que ello comporta.

Pero ya hemos visto que el compresor gira solidario de una turbina gracias a la cual recibe su impulso. Las turbinas trabajan en sentido inverso a los compresores y también la disposición de sus palas debe estar estudiada con gran atención para conseguir una velocidad de giro adecuada a las necesidades que el rodete compresor va a solicitar. Para ello también hay que contar con una velocidad de los gases de escape, los cuales de algún modo se encuentran también relacionados con la presión obtenida por el rodete compresor, que a su vez depende de la velocidad de la turbina, etc. Hay aquí, como puede verse una inter-relación de causas y efectos que si las consideramos con la debida atención nos darán buenas pistas sobre la cantidad de ingenio y sabiduría que se agrupan en una Máquina aparentemente tan sencilla como un turbocompresor. También hay que contar con otros factores como el ruido y las vibraciones que a las altísimas velocidades de giro que alcanzan estas máquinas pueden tener efectos negativos para su aplicación. Ello ha tenido que ser estudiado y eliminado por medio de una serie de disposiciones sobre las que también nos ocuparemos a lo largo de este capítulo.

De acuerdo con lo que se acaba de decir puede deducirse la necesidad de un detenido estudio del turbocompresor a través de las partes principales que consta, es decir, de las características de su compresor centrífugo y de su turbina como elementos fundamentales que son de la Máquina soplante. Ello nos lleva a realizar una distribución de los temas para su estudio que constará de las siguientes partes:

- Compresor
- Turbina
- Acoplamiento compresor turbina
- Otros factores

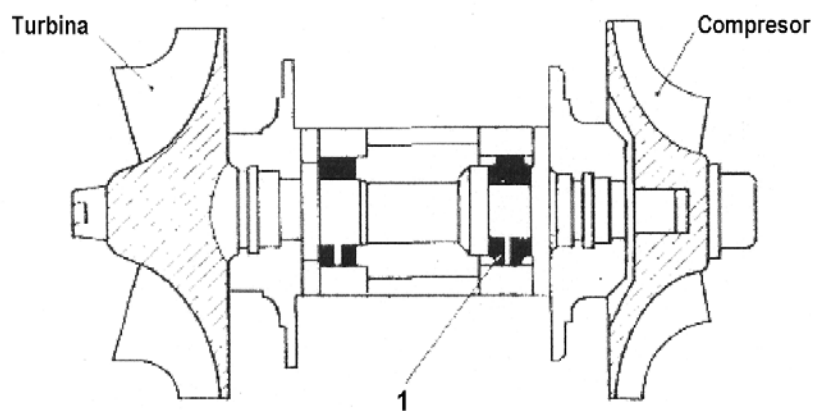
2.2.2 Constitución del eje del turbo

Es evidente que la pieza constituida por el conjunto del eje, en cuyos extremos se encuentran la turbina y el rodete compresor, viene a ser la pieza más importante de todo el conjunto del turbo. La turbina debe soportar tensiones mecánicas enormes debidas a su rápido giro, además de unas elevadísimas temperaturas. El rodete compresor tiene

también un gran compromiso por circunstancias parecidas. Por ello los rotores han de construirse con aleaciones ligeras y muy resistentes, por lo que se utilizan aleaciones de aluminio con tierras como el nio, que pueden proporcionar gran resistencia ante las altas temperaturas.

En la figura 2.3 se puede ver el aspecto que presenta el conjunto del eje de un turbo. Cualquier condición de funcionamiento de estos rodets determina siempre grandes velocidades, la importancia del equilibrado general del eje es muy grande. Incluso la tuerca con la que se produce la fijación de las piezas desmontables debe hallarse debidamente equilibrada.

Aspecto general de un turbocompresor
Figura 2.3



Fuente: LUCINI, M., "Turbomáquinas de vapor y de gas"

Entonces, la figura 2.3 nos muestra la disposición de un eje colocado en el cuerpo central de un turbocompresor. El eje debe apoyarse sobre cojinetes, que en los turbos rápidos están sustituidos por medio de láminas de cuproplomo flotantes hidrodinámicamente. Solamente en los turbocompresores muy grandes y por lo mismo lentos, se acude a la solución de utilizar rodamientos. Es importante observar en esta figura que el cojinete (1), que recibe el empuje axial queda alojado en el lado frío del compresor, que es la parte de condiciones de funcionamiento menos rigurosas.

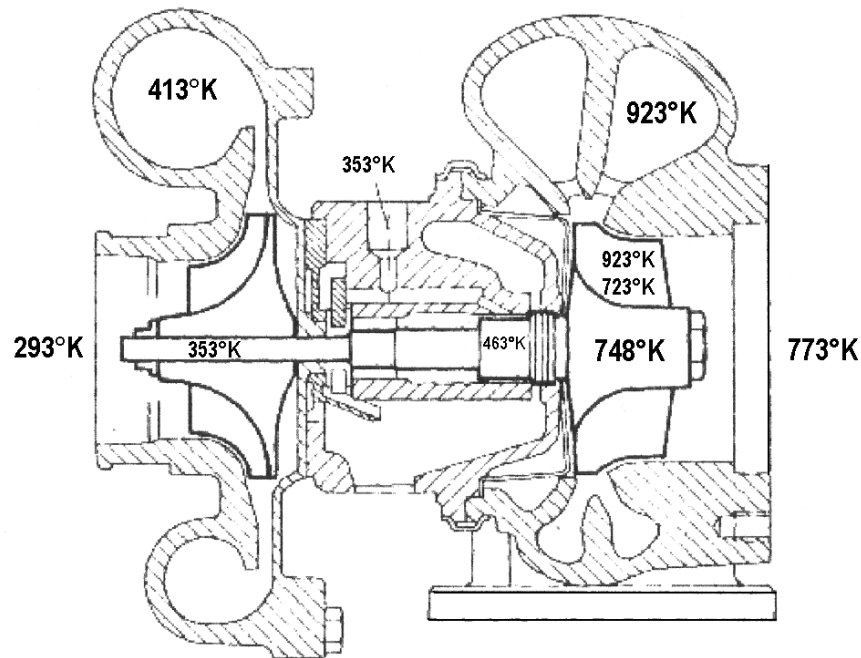
En los turbos pequeños la turbina se halla soldada al extremo del eje ya que dada su forma no puede labrarse con el mismo material del eje. Esto ocasiona que los procedimientos de soldadura sean muy particulares ya que la unión de ambas piezas tiene que ser muy precisa para no desequilibrar un conjunto que gira a tan elevadas velocidades. Por otra parte las altas temperaturas ejercerían tensiones muy poco adecuadas para permitir un proceso de soldadura normal. Se utiliza pues, otro sistema que se basa en un procedimiento de fricción. Para ello se necesita un mecanismo muy preciso que consiga controlar micras. Esta máquina puede hacer que el eje y el rodete se encaren perfectamente girando a diferentes velocidades. Al aplicarles una presión determinada, por el mismo calor desarrollado por la fricción de ambas piezas estas se sueldan entre sí sin que se produzca desgaste ni la más mínima deformación.

Tanto en el rodete compresor como en la turbina hay que contar con un estudio muy minucioso de la forma de sus álabes ya que se ha podido demostrar la gran influencia que la forma de estas palas tiene con respecto al rendimiento general del turbo. Variando las formas, se consiguen condiciones de funcionamiento muy diferentes del conjunto compresor-turbina. Según la forma de los álabes se consigue que las presiones sean ya importantes a bajas vueltas del motor, lo que representa una condición muy importante.

2.2.3 Temperaturas y materiales

La figura 2.4 ilustra y señala con números los grados centígrados de temperatura a que se mantienen las piezas y los gases, tomando como ejemplo un turbo de un motor estacionario. A pesar de esta situación que puede considerarse moderada desde un punto de vista técnico, obsérvese la gran diferencia que existe entre la zona en que se encuentra la turbina, que se mantiene alrededor de los 748.15°K y la zona del rodete compresor que lo hace a una temperatura de unos 353.15°K, tal como se indica. Estos valores resultan soportables.

Temperaturas particulares en un turbocompresor
Figura 2.4



Fuente: LUCINI, M., "Turbomáquinas de vapor y de gas"

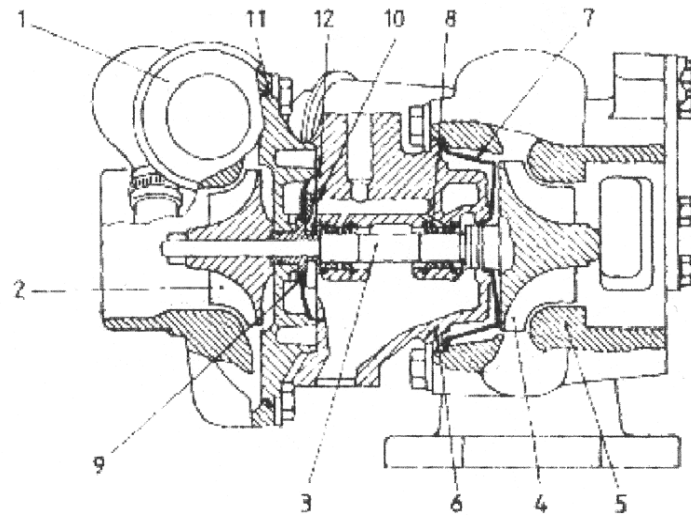
Pero al estar en contacto con los gases de escape que se mantienen a la temperatura de unos 923.15°K, provocan un aumento general de la temperatura de todos los elementos, de modo que los turbos deben ser muy estudiados en lo que respecta a la elección de los materiales que con ellos se van a emplear en su construcción para que puedan soportar todas esas cargas ocasionadas por el excesivo calor acumulado.

En cuanto a los materiales que intervienen en la construcción de un turbo, tema que guarda buena relación con la resistencia a los altos valores térmicos que la Máquina tiene que soportar, se verán algunos ejemplos con la ayuda de la figura 2.5 y que relaciona los materiales y aleaciones de que está construido un turbocompresor.

Relación de los diferentes materiales de que están constituidas las principales piezas de un turbocompresor.

1-Aleación de aluminio A 356, 2-Aleación de aluminio C 355, 3-Acero aleado, 4-5-6-fundición, 7-Acero inoxidable, 8-Bronce, 9-Acero aleado, 10-Bronce, 11-Juntas de papel, 12-Junta de Viton

Figura 2.5



Fuente: LUCINI, M., "Turbomáquinas de vapor y de gas"

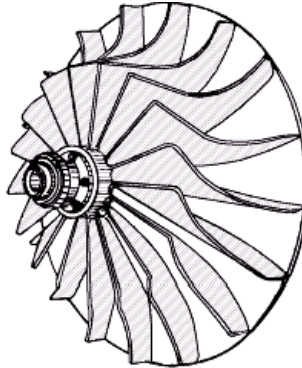
2.2.4 Estudio del compresor

El conjunto del compresor del turbo está regido por el mismo principio básico que resulta propio de los compresores centrífugos que ya se analizaron anteriormente. Su funcionamiento podría resumirse diciendo que se produce por la acción de un rotor, en cuya cabeza se han labrado unas paletas o álabes, que giran en el interior de una caja, cuerpo o estator dentro del cual se imprime al aire una fuerza de aceleración que lo dirige hacia la periferia de las palas. La posterior reducción de esta velocidad puede convertirse en un efecto de compresión del aire adquiriendo unos valores de presión a la salida bastante superiores a los valores de presión de la entrada del aire.

Para conseguir este objetivo todo compresor centrífugo debe disponer de los siguientes elementos fundamentales: en primer lugar de un rotor como el de la figura 2.6, que es la

parte principal de la Máquina; el rotor va provisto de paletas fijas desde las que toma el aire y lo lanza hacia el estator.

Rotor
Figura 2.6



Fuente: QUANTZ. L, “Motores Hidráulicos”

El aire penetra por una voluta de entrada que tiene por misión la canalización del aire hacia las paletas del rotor y su correcta distribución por toda la periferia.

Otro elemento fundamental es el estator que consiste en un cuerpo o carcasa que envuelve al rotor y por el que se canaliza el aire a su salida del mismo. Este aire va canalizado de esta forma hasta un difusor a su salida del rotor y en él se transforma la energía cinética imprimida al aire en energía acumulada en forma de presión. Consta de álabes fijos cuyo diseño tiene la mayor importancia para lograr el mejor rendimiento de la Máquina además de los convenientes valores de presión.

2.2.5 Estudio de la turbina

Ya sabemos que la función de la turbina es convertir en energía mecánica la energía que todavía existe en los gases de escape, la cual es, realmente, considerable. La turbina pues debe actuar de forma inversa a como lo hace el compresor. Su máximo rendimiento sería conseguir la transformación en trabajo de toda la energía que

contienen los gases de escape expulsándolos finalmente con la menor energía residual posible.

Así como el compresor centrífugo actúa por centrifugación del aire o del fluido que trata de comprimir, la turbina tiene que actuar atrayendo el gas a sus palas, es decir, actúa por fuerza centrípeta. Esta característica fundamental hace que el diseño de las turbinas vaya por caminos opuestos al que se pretende en el diseño de los compresores.

2.2.5.1 Turbinas de acción y de reacción

Dentro del grupo de las turbinas existe una clasificación previa de partida que tiene la mayor importancia: las turbinas pueden ser de acción o de reacción. Para explicar la diferencia que existe entre ellas pensemos que a través de la turbina se produce una cesión de energía térmica que se compone de dos términos. Uno es el que se transforma en variación de velocidad absoluta a la salida, para conseguir lo cual se ha elevado previamente todo lo posible en el distribuidor, y el otro, la caída de calor en el rodete. El primero transforma la energía cinética en trabajo. El segundo transforma primero la energía térmica en cinética y luego a su vez en mecánica. En el primero, el de acción, no hay caída térmica alguna en el rodete mientras que en el de reacción no hay cambio de velocidades.

Una turbina no funciona siempre a plena potencia y la variación del rendimiento para las cargas fraccionarias es un factor de gran importancia.

Sus límites de funcionamiento están impuestos por el bombeo del compresor, la temperatura de admisión máxima de la turbina y los puntos de funcionamiento de potencia.

De esta forma es necesario clasificar a las turbinas según la dirección con que ingresa el fluido en el rodete; se distinguen entonces:

Turbina axial: En las que el fluido entra en la dirección al eje

Turbinas radial: Donde el fluido ingresa tangencialmente sobre la circunferencia del rodete.

Ambos tipos pueden presentar caracteres distintivos que permiten separarlas radicalmente entre sí de la siguiente forma:

Turbina de reacción: El fluido al entrar al rodete tiene energía cinética y potencial y al moverse por los espacios que hay entre los álabes, ocurre una aceleración por el aumento de presión. Entonces, la fuerza de salida ejerce una reacción sobre la cámara de álabes, cuya componente horizontal se convierte en fuerza periférica.

Turbina de acción. Solo existe energía cinética a la entrada del rodete y el fluido se mueve libremente a lo largo del alabe sin tocar la cara posterior del alabe inmediato; allí son desviados, determinando sobre la paleta una presión periférica.

Las turbinas de acción han de tener todas sus aletas equilibradas, pero ello se consigue fácilmente colocando los distribuidores por parejas diametralmente opuestas. En cambio, en las de reacción, como quiera que la presión en cada cara de la turbina sea diferente, la admisión ha de ser total para no tener retornos.

Las turbinas de acción no son aptas, por lo tanto, para recibir las impulsiones intermitentes de los gases de escape, que al ser producidos por distintos cilindros de un mismo motor, no forman un chorro perfectamente continuo. Por lo tanto, las turbinas utilizadas en motores alternativos son turbinas de reacción.

2.2.5.2 Acoplamiento compresor/turbina

Hasta el momento se ha estudiado por separado las dos piezas fundamentales de un turbocompresor. Ambas tienen un trabajo muy destacado en el funcionamiento general

del grupo como se ha podido deducir de lo explicado y por lo mismo requieren por parte de los diseñadores de estas máquinas, conocimientos para qué al acoplarlas, funcionen ambas en las mejores condiciones posibles.

Por el momento se cuenta con la gran ventaja de que ambas máquinas, el compresor centrífugo y la turbina centrípeta, funcionan sencillamente a la inversa, lo que las hace muy aptas para ser aplicadas a un mismo eje, sin embargo, hay que tener en cuenta que cada punto en el funcionamiento de un turbocompresor corresponde a un equilibrio entre la potencia absorbida por el compresor y la misma potencia proporcionada por la turbina, y que la potencia absorbida por el compresor debe estar relacionada con los valores de presión y el gasto de aire que se efectúa. La obtención de este equilibrio no es ciertamente fácil y mucho menos teniendo en cuenta los diferentes regímenes de giro propios del motor, los cuales se reflejan en la turbina y tienden a crear una desigualdad entre los valores de las potencias entre distintas máquinas. Por estas razones la elección de una turbina que sea idónea para un determinado compresor debe llevarse a cabo tras una serie de cálculos previos sobre los caudales, presiones, temperaturas, etc., que tiene su complicación y que son propios de los ingenieros especializados en el diseño de estas máquinas. En muchas ocasiones estos cálculos se realizan por medio de tablas o gráficos desde los que se van seleccionando datos hasta dar con las medidas correctas para la perfecta armonización de ambas máquinas. De cualquier modo, ha de ser finalmente el banco de pruebas el que proporcione los datos completos de un turbocompresor así montado. El fabricante realiza las pruebas pertinentes de su máquina y crea una serie de gráficos como resultado de las fases de experimentación de su producto, y son estos gráficos los que se proporcionan al ingeniero. Así pues, la aplicación de turbina y compresor se realiza inicialmente por especialistas.

2.2.5.3 Otros factores

El turbocompresor es una Máquina bastante sencilla si la estudiamos desde el punto de vista puramente mecánico. Pero tiene el inconveniente de las duras condiciones en que trabaja, especialmente de temperatura y también de dificultades de engrase, a las que

hemos de unir sus altísimas velocidades de giro. Especialmente por culpa de estas últimas, el turbocompresor puede estar sometido a condiciones críticas en lo que respecta a las vibraciones y también puede ser causa de molestos ruidos, factores que para un análisis particular de cada proyecto específico deberán ser considerados y estudiados por separado.

CAPÍTULO III

DISEÑO

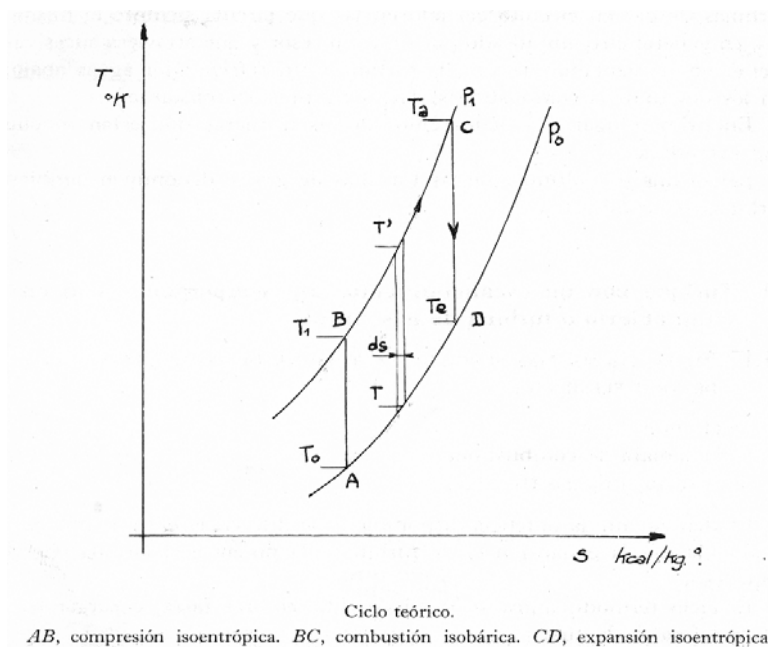
3.1 Condiciones Termodinámicas iniciales

Está claro entonces que las turbinas de gas con circuito cerrado son aquellas en las que sus gases de escape circulan siempre en el mismo gas de admisión, en general aire, y que atraviesan sucesivamente recalentadores, refrigeradores y otros dispositivos.

La de tipo abierto en cambio, envía los gases de escape a la atmósfera, las cuales son mucho más extendidas, llamadas también turbinas de combustión.

En cualquier caso, el ciclo termodinámico se puede dividir en tres fases, encargándose la atmósfera de la cuarta. Así, la primera es de compresión, la segunda corresponde a la aportación de calor a la cámara de combustión. Una parte del aire comprimido se utiliza para la combustión de un combustible gaseoso o líquido, el resto permite enfriar las paredes de la cámara de combustión y mezclado con los gases calientes resultantes de la combustión o gases de escape, lleva la temperatura a un valor admisible para la turbina de gas. La tercera fase la constituye la expansión de los gases calientes. Esto se observa en la figura 3.1.

Ciclo termodinámico correspondiente para turbina de reacción
Figura 3.1



Fuente: MARON SAMUEL H. & PRUTON CARL F., "Fundamentos de Fisicoquímica",

Los turbocompresores, al tener dos rodetes, uno de entrada radial y otro de entrada axial, cada rodete se considera como una turbina; la axial de admisión y radial de escape pero determinadas como de ciclo abierto, y su estudio termodinámico entonces es similar al estudio del ciclo Brayton para turbomotores.

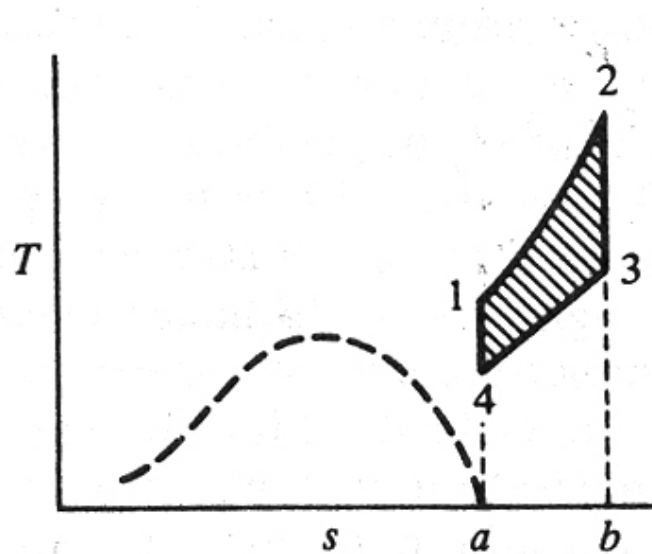
3.1.1 Ciclo Brayton

La tecnología de la turbina de gas ha sido perfeccionada aceleradamente por la industria, de modo que un ciclo de alta temperatura que utilice un fluido de funcionamiento gaseoso es una manera práctica de conversión de energía para muchas aplicaciones no solamente en la propulsión de aeronaves sino también en plantas de energía de mayor rendimiento para uso en automóviles. El ciclo idealizado para un fluido de

funcionamiento gaseoso que recibe y descarga calor a temperatura constante es el ciclo Brayton.

Este ciclo, utiliza un fluido de funcionamiento gaseoso de una sola fase en todo el ciclo y consiste en etapas de expansión y compresión isentrópicas, en otras palabras, ciclos de adición y sustracción de calor a presión constante que utilizada en gases perfectos puede observarse en la figura 3.2.

Ciclo Brayton
Figura 3.2



Fuente: MARON SAMUEL H. & PRUTON CARL F., "Fundamentos de Fisicoquímica"

En este ciclo, se añade calor a lo largo del camino 1-2 y se sustrae a lo largo del camino 3-4. Así, comparando con la figura 3.1, el proceso de una turbina consiste en etapas AB (compresión isentrópica), BC (combustión isobárica), y CD (expansión isentrópica).

3.1.2 Aplicaciones iniciales

Para iniciar el estudio general de condiciones y características que este proyecto utiliza, es necesario determinar datos iniciales de construcción, prueba y condiciones aplicadas en las diferentes etapas.

De esta forma se exponen los siguientes datos iniciales o parámetros que serán utilizados en el proceso.

3.1.2.1 Dimensiones

El turbocompresor utilizado posee ya características físicas que serán utilizadas en el cálculo. Debido a que el turbocompresor utilizado, de procedencia norteamericana, posee magnitudes inglesas, se consideraran estas como parámetro inicial de datos que se observan en la figura 3.3:

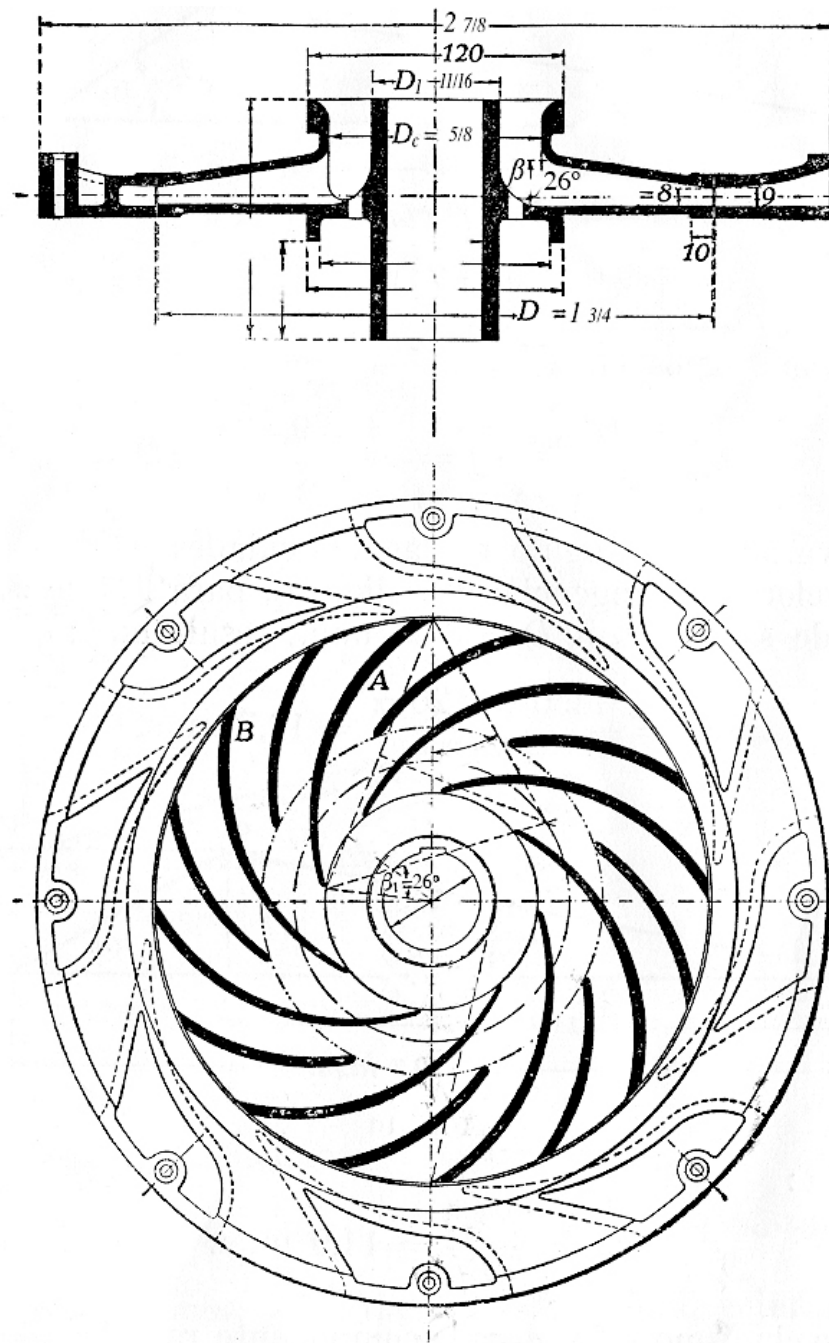
Diámetro exterior = $D_2 = 2 \frac{7}{8} \text{ in} = 0.073 \text{ m}$

Diámetro de cubo = $D_c = \frac{5}{8} \text{ in} = 0.015 \text{ m}$

Diámetro inicio álabes = $D_1 = \frac{11}{16} \text{ in} = 0.017 \text{ m}$

Diámetro de ingreso de aire en el caracol de entrada o fin de álabe = $D = 1 \frac{3}{4} \text{ in} = 0.04445 \text{ m}$

Rodete de admisión (Vista Frontal)
Figura 3.3



Fuente: QUANTZ, L, "Motores Hidráulicos"

3.1.2.2 Velocidad de entrada a compresión

En este caso, esta velocidad axial del fluido considera solamente las condiciones de inicio del aire a comprimir, y puesto que sobre este no influye el número de revoluciones de funcionamiento de la Máquina, solo puede ser determinada por las condiciones iniciales del aire a comprimir, siendo:

Velocidad del viento aproximada = 5 m/s = $V_i = C_o$

Utilizando la ecuación de continuidad:

$$Q = A \cdot V \quad (3.1)$$

Q = Caudal (m^3/s)

A = Área (m^2)

V = Velocidad inicial (m/s) = V_i

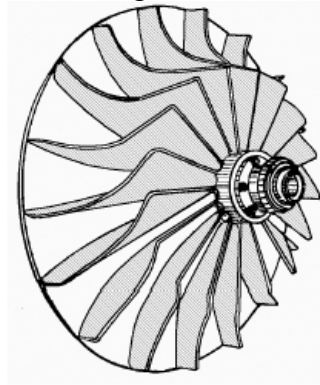
Y considerando A , como área de entrada de aire, que en este caso es determinada por la entrada del turbocompresor (D), entonces

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V_i = 0.785 \cdot 0.04445^2 m^2 \cdot 5 m/s = 7.75 L/s = 7.758E-3 m^3/s$$

El rodete utilizado es el de la figura 3.4.

Rodete de admisión (Vista lateral)

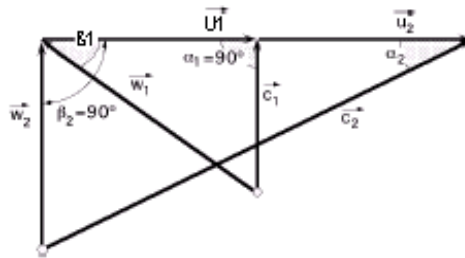
Figura 3.4



Fuente: QUANTZ, L, "Motores Hidráulicos"

Triangulo de velocidades

Figura 3.5

 β_1 = Angulo de álabes ($^\circ$) U_1 = Velocidad tangencial final de alabe (m/s) U_2 = Velocidad tangencial final de salida (m/s) W_1 = Velocidad relativa inicial (m/s) W_2 = Velocidad relativa final (m/s) C_1 = Velocidad absoluta de entrada (m/s) C_2 = Velocidad absoluta de salida (m/s) α_1 = Angulo inicial de entrada ($^\circ$) α_2 = Angulo de salida ($^\circ$)

Se observa entonces que la variable U es la velocidad tangencial en cada punto. Como sabemos, la velocidad tangencial es proporcional al diámetro respectivo con la constante

de movimiento angular correspondiente, en este caso al número de revoluciones por minuto (N).

Así:

$$U = 2\pi r \cdot N = \frac{N\pi \cdot d}{60} = [\text{m/s}] \quad (3.2)$$

N = Número de revoluciones por minuto (rpm)

$$U1 = \frac{N\pi \cdot D_1}{60} = 5.486E-2 \text{ N} \quad [\text{m/s}]$$

$$U2 = \frac{N\pi \cdot D_2}{60} = 0.229N \quad [\text{m/s}]$$

Entonces el caudal de entrada verificado a velocidad del viento y diámetro de ingreso al caracol (7.75 L/s) debe referirse ahora a la velocidad C1 que además es perpendicular a U1, pero con la sección de área correspondiente a la diferencia de diámetros de fin de álabes (D) y diámetro del cubo (Dc), refiriéndonos a la ecuación 3.1 entonces:

$$Q = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - D_c^2) C1$$

$$\begin{aligned} \text{Donde } Q &= 7.758E-3 \text{ m}^3/\text{s} \\ D &= 0.04445 \text{ m} \\ D_c &= 0.015 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Entonces} \quad C1 = 5.73 \text{ m/s}$$

A continuación:

El rodete de compresión utilizado además posee la particularidad de tener 14 álabes, lo que significa que el ángulo entre álabes es:

$$\beta_1 = \frac{360^\circ}{14} = 25.71^\circ$$

Y observando el triangulo de velocidades (teorema de Pitágoras) de la figura 3.5:

$$\tan \beta_1 = \frac{C1}{U1} = 0.481 = \frac{5.73}{U1}$$

Y: $U_1 = 11.89 \text{ m/s}$

además,

$$W_1 = \sqrt{(U_1^2 + C_1^2)} = 13.208 \text{ m/s}$$

La ecuación de velocidad angular $\omega = \frac{U}{D} \quad (3.3)$

ω = Velocidad angular (rad/s)

U = Velocidad Tangencial (m/s)

D = Diámetro (m)

Siendo la misma velocidad angular en el triángulo de velocidades entonces:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

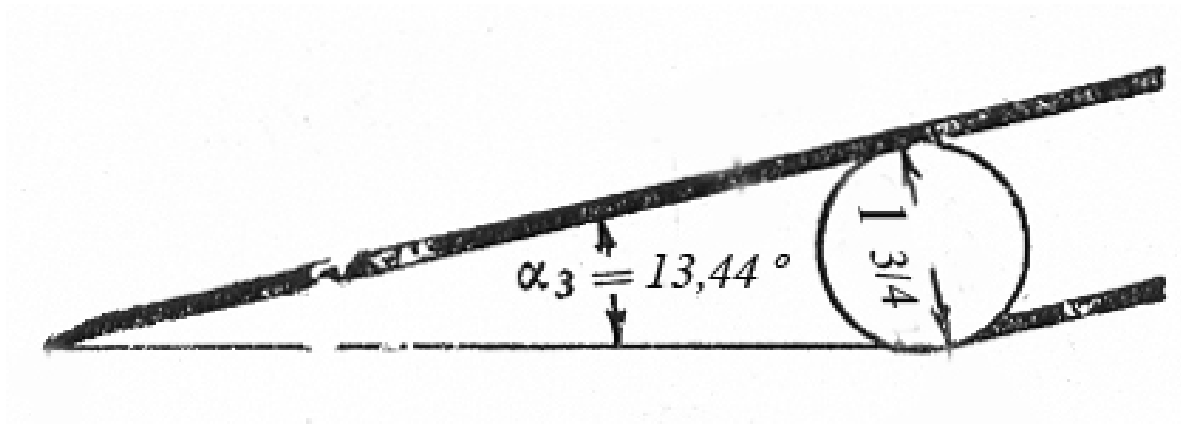
Y, $U_2 = 49.765 \text{ m/s}$

Estos valores son parámetros dimensionales del rodete de entrada que deberán ser aplicados a la condición de régimen de revoluciones (n) que no son constantes.

Tenemos también que considerar un diámetro de salida del caracol de admisión del turbocompresor utilizado, y un ángulo de salida α_3 correspondiente, donde:

$$\tan \alpha_3 = \frac{D_1}{D_2} = \frac{11/16 \text{ in}}{2^{7/8} \text{ in}} \text{ y } \alpha = 13.44^\circ \text{ correspondiente a la salida del caracol}$$

Dimensiones del caracol a la salida
Figura 3.6



De esta forma, la velocidad absoluta C_2 que sale hacia la cámara de combustión en este caso será:

$$\text{Sen } \alpha_3 = \frac{U_2}{C_2} = \frac{49.75}{C_2} = 0.232$$

Donde

$$C_2 = 213.979 \text{ m/s}$$

Y el caudal de entrada al turbocompresor según 3.1 será:

$$Q_1 = A \cdot C_2 = 0.785 (0.445^2) 213.979 = 332.051 \text{ E-3 m}^3/\text{s}$$

De esta manera, lo anteriormente expuesto demuestra la alta capacidad de compresión que un turbocompresor tiene, incluso sin considerar el número de revoluciones. Queda demostrado entonces que para el ciclo Brayton se ha logrado una excelente compresión isentrópica que por los caudales determinados consigue una relación de presiones de Q a $Q_1 = 42.795$ a 1.

Ahora consideremos otros parámetros. Todo proceso isentrópico puede usar las tablas generales de gases para determinar condiciones finales si se tiene una presión o volumen relativos. Para esto utilizaremos las tablas del Anexo 2.

Consideremos el aire en condiciones atmosféricas, es decir a 101.325 kPa de presión (1 atmósfera) y 298.999°K de temperatura (25°C) o aproximadamente 537°R para las tablas. Quiere decir que entonces la presión de salida será de 42.795 atmósferas según la relación de presiones anteriormente indicada...

Las tablas indican entonces que tendríamos una presión relativa de ingreso:

$$P_{R1} = 1.3593$$

Entonces,

$$P_{R2} = P_{R1} \cdot \frac{P_2}{P_1} \quad (3.4)$$

P_{R1} = presión relativa de ingreso

P_{R2} = presión relativa final

P_2 = presión final (kPa)

P_1 = presión inicial (kPa)

$$P_{R2} = 1.3593 \cdot \frac{433.629}{101.325} = 58.172$$

Que por las tablas y por interpolación

$$T_2 = 1515.838^\circ\text{R} = 842.132^\circ\text{K}$$

Ahora la entalpía o variación de entalpía:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = f_h(T_2) - f_h(T_1) \quad (3.5)$$

Δh = Variación de entalpía (J/kg)

H_2 = entalpía final (J/kg)

H_1 = entalpía inicial (J/kg)

Nuevamente por las tablas de gases $f_h(1515.838) = 373.367$ Btu/lbm y $f_h(537) = 128.10$ Btu/lbm

Entonces:

$$\Delta h = 245.267 \text{ Btu/lbm} = 570.491 \text{ kJ/kg}$$

De igual forma vamos a calcular la entropía con las mismas tablas:

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad (3.6)$$

Δu = Variación de entropía (J/kg)

u_2 = Entropía Final (J/kg)

u_1 = Entropía inicial (J/kg)

$$f_u(1515.838) = 269.444 \text{ Btu/lbm}$$

$$f_u(537) = 91.53 \text{ Btu/lbm}$$

$$\Delta u = 177.914 \text{ Btu/lbm} = 413.828 \text{ kJ/kg}$$

La Entropía S ahora (a presión constante), se obtiene:

$$S = \theta(T) - R \ln \frac{P}{P_o} \quad (3.7)$$

S = Entropía a presión constante (J/kg $^{\circ}$ K)

$\theta(T)$ = Entropía en función de la temperatura (J/kg $^{\circ}$ K)

R = Constante de los gases perfectos (J/g $\cdot$ mol $\cdot^{\circ}$ K)

P = presión final (Pa)

P_o = presión inicial (Pa)

Donde R (Anexo 3) de la tabla de gases

$$R = 1545 \frac{\text{lb}\cdot\text{ft}}{\text{lb}\cdot\text{mol}\cdot^{\circ}\text{R}} = 8.3144 \frac{\text{J}}{\text{g}\cdot\text{mol}\cdot^{\circ}\text{K}}$$

Se debe considerar también que el aire tiene un peso molecular particular como gas de 28.964 lbm/lb $\cdot$ mol, que se observa en la tabla del Anexo 4. Se pueden facilitar los cálculos utilizando tablas genéricas de conversión de unidades que se muestran en el Anexo 5.

Entonces la constante del aire O₂

$$\begin{aligned} R &= (1545 \text{ lbf}\cdot\text{ft}/\text{lb}\cdot\text{mol}\cdot^{\circ}\text{R}) / (28.964 \text{ lbm}/\text{lb}\cdot\text{mol}) \\ &= 53.342 \frac{\text{lb}\cdot\text{ft}}{\text{lbm}\cdot^{\circ}\text{R}} = 0.0688 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm}\cdot^{\circ}\text{R}} = 0.288 \frac{\text{J}}{\text{g}\cdot^{\circ}\text{K}} \end{aligned}$$

También, la variación de entropía es:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad (3.8)$$

ΔS = Variación de entropía a presión constante (J/kg°K)

S_2 = Entropía final (J/kg°K)

S_1 = Entropía inicial (J/kg°K)

Y según la ecuación 3.7 ajustando temporalmente las magnitudes a las de las tablas,

$$S_2 = 0(1515.838) - 0.0688 \ln 42.795 = 0.856 - 0.0688 \cdot 3.78 = 0.598 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^\circ\text{R}}$$

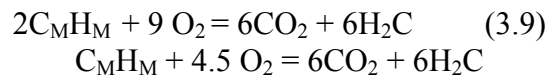
$$S_1 = 0(537) - 0.0685 \ln 1 = 0.599 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^\circ\text{R}}$$

$$\Delta S = -0.00099 \frac{\text{Btu}}{\text{lbm} \cdot ^\circ\text{R}} = -4.169 \text{E-}3 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{K}}$$

Así, queda demostrado que el proceso es isentrópico pues los límites de variación de ΔS son aproximadamente cero.

Ahora para la expansión, es necesario calcular primero la reacción del G.L.P. que se utilizara como combustible y el O_2 que es el aire comburente.

El Anexo 6 es una tabla ejemplo de las reacciones de combustión y productos resultantes generales. Así:



El peso molecular del aire referido anteriormente es de 28.964 aproximadamente 29. Así, para combustionar una molécula de combustible según la ecuación 3.9 se requieren 4.5 moléculas de O_2 . Siendo el aire una composición de varios gases donde su porcentaje de oxígeno se aproxima al 21% como se observa en el Anexo 7 entonces la fracción molar contenida en función del peso molecular del aire será de 0.21.

Se le considera al G.L.P comercial en nuestro medio como $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_4\text{H}_{10}$ (aproximado químicamente a C_3H_8) con un peso molecular de 44.14 (según Anexo 4). Entonces:

$$G = \frac{O \cdot P_a}{P_g \cdot F} \quad (3.10)$$

G = relación de masa aire/combustible

O = Fracción molar de oxígeno para reacción completa (moléculas) = 4.5

Pa = Peso molecular del aire = 28.964 lbm/lb·mol

Pg = Peso molecular del combustible (G.L.P.) = 44.14 lbm/lb·mol

F = Fracción molar de aire = 0.21

$$G = \frac{4.5 \cdot 28.964}{44.14 \cdot 0.21} = 14.078 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg Combustible}}$$

En las máquinas térmicas, la relación de masa de aire con respecto al combustible se conoce como relación estequiométrica α .

$$\alpha = 14.078: 1$$

CAPÍTULO IV

SISTEMAS AUXILIARES

4.1 Sistema de encendido

En un motor de combustión interna, como el del presente caso, se hace necesario un dispositivo capaz de iniciar la ignición de la mezcla de combustible y comburente mediante cualquier método de adición de calor.

Generalmente en estos casos hablamos de flama que adicione el calor necesario para inflamar la mezcla y producir la combustión.

Un motor de ciclo Otto, usualmente utiliza el método de generar un arco de corriente que debido a la intensidad se convierte en una pequeña chispa de encendido, utilizando una bujía de electrodos a la que se aplica un alto voltaje para producir el cruce del arco entre estos dos elementos metálicos.

La aplicación de voltaje requerido necesariamente utiliza un transformador que aumente un voltaje mínimo al requerido para el propósito. Hablamos de una bobina de encendido, es decir un conjunto de arrollamientos que induzcan un aumento de voltaje, elemento muy conocido en nuestro medio en los vehículos o automotores.

Pero también, este dispositivo debe lograr una frecuencia de encendido capaz de satisfacer los diferentes regímenes de circulación del fluido de combustión según las características de funcionamiento que se desee obtener. La bobina de encendido de los automóviles entonces utiliza una señal de entrada que inicie este ciclo de ignición; así, los vehículos obtienen esta señal en función del régimen de revoluciones del motor por un medio mecánico, conocido como ruptor, el cual corta la inducción en la bobina cada

vez que los componentes mecánicos en rotación indiquen el momento preciso de ignición.

Una turbina comparte estos criterios para el encendido, solamente que es muy difícil obtener esta señal de manera mecánica, por los pocos componentes móviles que forman parte de la misma. Además, esta no requiere efectivamente de un punto preciso de ignición, sino que el encendido debe ser continuo, aunque también referente al número de revoluciones de funcionamiento.

4.1.1 Señal de entrada

A partir de estas generalidades, es posible ajustar un sistema de encendido mediante bujía y bobina de alta tensión comunes en la industria automotriz. Por lo tanto habrá que aplicar un método de señal de ignición combinado con otro de frecuencia de encendido.

La electrónica actual nos permite fabricar un sistema de encendido utilizando componentes que proporcionen esta señal utilizando corriente en vez de los métodos mecánicos clásicos o ruptores. Así, es posible utilizar un oscilador de frecuencia, que aplique la señal necesaria para que la bobina logre trabajar con la bujía en un ciclo de encendido.

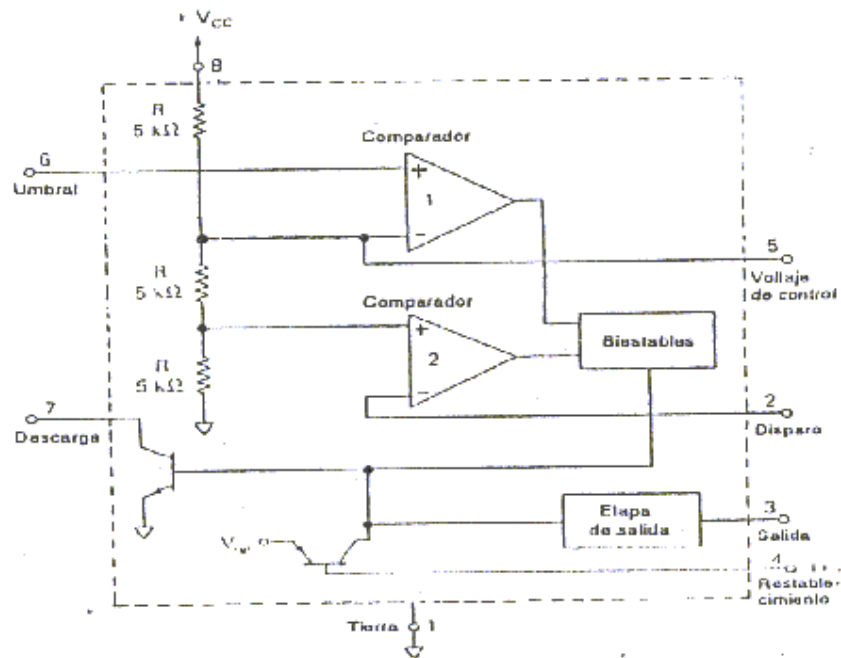
La forma característica de conseguir un oscilador simple que se limite a brindar esta señal, se puede conseguir mediante un temporizador 555.

4.1.2 Temporizador 555

Este circuito integrado es capaz de producir intervalos de tiempo medidos según las circunstancias y opera con voltajes de alimentación de 5 a 18 voltios, por tanto es compatible con muchos circuitos. El temporizador puede considerarse como un conjunto funcional de dos comparadores, dos transistores, tres resistencias, un flip-flop y una etapa de salida.

Componentes del integrado 555

Figura 4.1

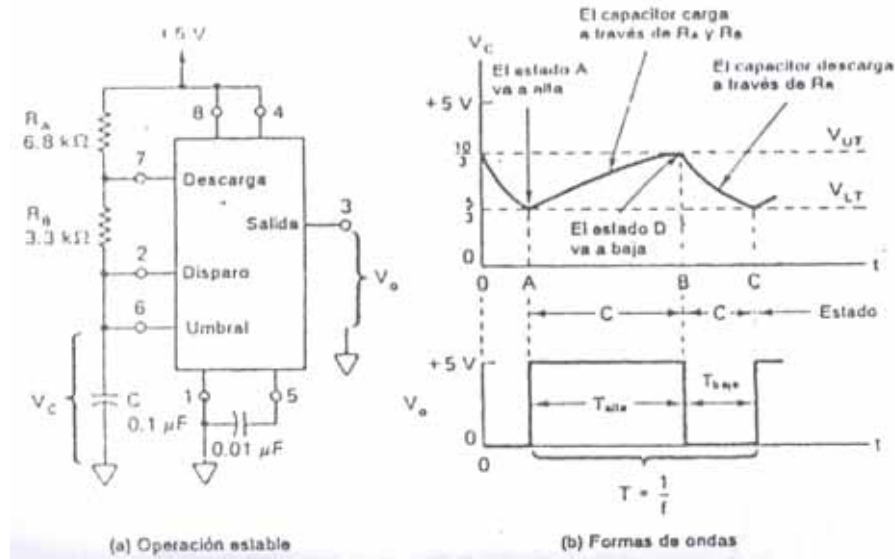


Fuente: CAMERE, "Berechnungen bei Francisturbinen"

Este opera como multivibrador, es decir que el voltaje de salida cambia de un estado alto a uno bajo y reinicia el ciclo. El tiempo de salida en alto o bajo, lo determina un circuito de resistencia – capacitor conectado en forma externa al temporizador. Así, puede operar como multivibrador de disparos, concepto que puede sustituir al raptor clásico de señales y que será aplicado en el presente proyecto.

Ciclo de operación del multivibrador

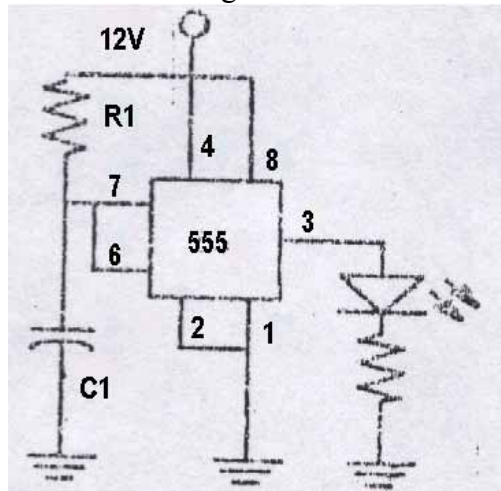
Figura 4.2



Fuente: CAMERE, "Berechnungen bei Francisturbinen"

Observamos pues, que es posible manipular la frecuencia de este temporizador utilizando capacitores. La carga y descarga de un condensador se puede usar en un circuito práctico simple y de uso popular en el mercado.

Diagrama de conexión del multivibrador
Figura 4.3



Fuente: CAMERE, "Berechnungen bei Francisturbinen"

Cuando el terminal 2 de C1 se conecta momentáneamente a tierra, hay un pulso en el terminal 3. La duración de este pulso positivo está determinado por R1 y C1, ya que estos dos componentes forman una constante de tiempo.

Se puede colocar en vez de R1 un potenciómetro para variar la frecuencia de pulso. De esta manera se podrá controlar manualmente la frecuencia de encendido según se requiera para su utilización en la turbina.

El pulso de salida en este caso no tiene la capacidad de controlar el corte de corriente de una bobina, sin embargo, se puede utilizar este pulso para controlar un conmutador o relé capaz de trabajar con el amperaje que utiliza la bobina. Por lo tanto, en el circuito expuesto, se ha utilizado esta señal de disparo para controlar la apertura o cierre de un relé, capaz de inducir o cortar el voltaje de entrada hacia la bobina y a la vez generar una chispa en la bujía.

Entonces, el temporizador es alimentado con 12 voltios que es lo mas practico en este caso. Este va a generar un pulso de alimentación a la bobina y otro de corte, pulso que en el primer caso provocara un campo magnético en el arrollamiento primario y en el

segundo un corte e inducción en el secundario, o sea un aumento de tensión requerido para el salto de la chispa en los electrodos.

Así se ha fabricado el sistema de encendido, donde, mediante el potenciómetro se deberá controlar la frecuencia de encendido manualmente observando el funcionamiento del turbocompresor en marcha. De esta forma se puede controlar el número de revoluciones de trabajo de la turbina, aumentando o disminuyendo la frecuencia de encendido.

En la práctica ha resultado muy útil y apropiado para el caso, y se han observado resultados muy convenientes de manipulación del régimen de revoluciones controladas por el usuario y a criterio de las condiciones de funcionamiento que se requieran.

4.2 Sistema de lubricación

Un turbocompresor, utiliza el sistema de lubricación propio del motor al que pertenece, es decir, utiliza la presión de la bomba de lubricación mecánica accionada por la Máquina en su funcionamiento.

Nuevamente se observa que esta turbina no dispone sino de pocos componentes que resultan estrictamente útiles para trabajar en la transformación de energía térmica a la mecánica, lo cual imposibilita acoplarlos innecesariamente para otros fines.

Por lo tanto, reproduciendo el sistema básico requerido para la lubricación en circunstancias similares, se utilizara una bomba de lubricación, pero bajo las circunstancias accionada por un sistema ajeno a la misma: un motor eléctrico de accionamiento.

Entonces, las revoluciones de la bomba, es decir la presión, serán controladas por el giro de este motor que en el presente caso actuara en régimen constante provocando una presión genérica y suficiente para aliviar los esfuerzos de rozamiento que el turbo va a requerir durante este caso particular...

Los resultados prácticos obtenidos, satisfacen a cada régimen de giro obtenido, ya que se utilizo un motor sobredimensionado considerando factores de seguridad, que proporcionan una presión suficiente y apropiada.

4.3 Sistema de arranque

Un turbocompresor usual inicia su funcionamiento utilizando la inercia de gases de escape que se aplican al rodete de salida y que generan su rotación. El presente caso requiere entonces de igual forma un sistema auxiliar de inicio de funcionamiento, que provoque inicialmente la compresión del fluido de combustión para que, una vez ignicionado mantenga su funcionamiento.

De igual manera que en los motores genéricos de combustión interna se requiere de un arranque, la turbina utilizara otro motor eléctrico que inicie la rotación de la misma para generar la fuerza centrífuga necesaria de automoción.

Análogamente a los sistemas utilizados entonces, se utilizara un mecanismo que proporcione el giro inicial para este propósito. La ubicación más apropiada es acoplar un mecanismo adicional de giro a los rodets.

Por lo tanto se ha considerado conveniente, aplicar un torque inicial al rodete de entrada mediante la transmisión de giro de un motor eléctrico que pueda acoplarse axialmente al eje del turbocompresor en el inicio de su funcionamiento.

En la práctica, esto se ha conseguido al acoplar un motor directamente conectado a este eje para su arranque, que luego se desconecte una vez iniciada la rotación de la Máquina. Funcionalmente se ha optado por un medio mecánico: un motor eléctrico que será conectado manualmente al árbol de rodets y que será retirado cuando se inicie el ciclo autónomo de funcionamiento.

Aunque resulte relativamente impropio por condiciones de seguridad, consideraremos que el proyecto es experimental en un inicio, o sea que no se disponen de mayores conceptos de aplicaciones más apropiadas evaluadas anteriormente. Sin embargo, el factor seguridad está totalmente controlado, puesto que la ignición del combustible también es operada manualmente por el usuario, cosa que permite controlar los ciclos de arranque e ignición individualmente y bajo criterio del operador de la Máquina.

CAPÍTULO V

CONSTRUCCIÓN

5.1 Montaje General

El turbocompresor Diesel, se encuentra soportado en una estructura metálica que será la base de instalación de todos los componentes.

Sobre el caracol de admisión, ira conectada la cámara de combustión, en la cual se inyectara el combustible que mezclado con el aire comprimido y mediante la adición de calor que proporciona el sistema de encendido, aportara la fuerza de expansión de la combustión que en ella se da, misma que empujara al rodete de salida para provocar su giro.

Conexión de la cámara de combustión con el turbocompresor
Figura 5.1



5.1.1 Cámara de combustión y encendido

En este mecanismo, formado por un tubo de acero inoxidable de 3 pulgadas o 0.0762 metros, se coloca el difusor en la parte superior. Este tiene un calibre de 1 milímetro y es el medio por el cual se inyecta el G.L.P. a una presión aproximada inicial de 68.94 kPa, que se irá incrementando conforme aumenta el giro de la turbina. Además, en su parte lateral, va instalada la bujía para el encendido, la que brindada chispa para la ignición y que trabaja como ya se expuso por una bobina común de automóvil.

Cámara de combustión
Figura 5.2



5.1.2 Circuito de alimentación

El aire comprimido pasa por medio de una tubería de P.V.C. hacia la cámara de combustión como se aprecia en la figura 5.4.

Entrada de aire
Figura 5.4



El sistema de alimentación no es más que un cilindro domestico de gas al que mediante la adición de manómetros de presión para controlar el paso de combustible y tuberías de cobre se transporta el G.L.P hacia el mecanismo difusor.

Manómetros de control de alimentación.
Figura 5.6



5.2 Pruebas preliminares

La construcción de la cámara de combustión se fabrico con la unión de dos tubos concéntricos, el interior de 1.25 pulgadas que llamaremos tubo de flama y el exterior de 3 pulgadas correspondiente al tubo de salida del turbocompresor o combustor.

Existen dos tuberías en la cámara de combustión, la principal que recibe el aire del compresor y la otra que se convierte en el tubo de flama en donde va instalado un inyector de combustible. Estos conductos brindan las siguientes ventajas:

- El tubo de flama solo recibe parte el aire que entra que sirve para iniciar la combustión, el resto del aire se mezcla con los gases combustionados enfriándolos para que los gases que inciden en el turbo no lo sobrecalienten
- El tubo de flama almacena el área de combustión de la mezcla, lo que mejora la combustión específica en un lugar y no distribuida inapropiadamente.
- La temperatura del tubo de combustión es aprovechada por este diseño puesto que no recibe todo el calor de la combustión y además es enfriada por el exceso de aire.

5.2.1 Primera prueba

Los primeros resultados del combustor ya instalado con el turbocompresor proporcionaron una mezcla demasiado pobre para ser auto sustentada. Esto puede deberse a los siguientes parámetros:

- La rueda del compresor envía demasiado aire para las dimensiones de la cámara de combustión,
- Los orificios realizados en el tubo de flama son demasiados o muy grandes
- La bujía está ubicada muy cerca de la zona de turbulencia de ingreso del aire comprimido, lo que la hace demasiado fría

- La distribución de orificios no produce la suficiente turbulencia para homogenizar correctamente la mezcla de aire combustible, probablemente haya que variar los ángulos de cada orificio.

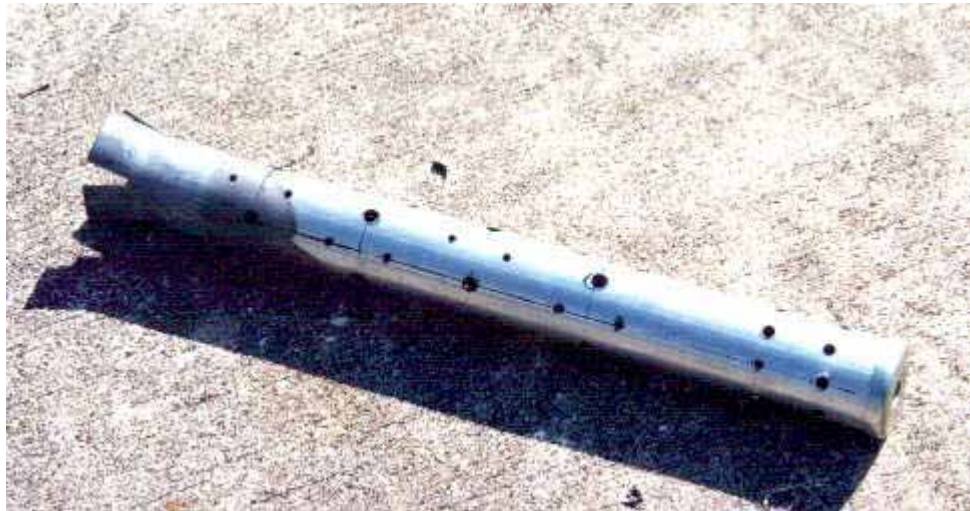
Tubo de Flama
Figura 5.7



5.2.2 Segunda prueba

Se procede entonces a sustituir el tubo de flama con otro del mismo diámetro pero con menos orificios y otra distribución de números, para experimentar las variaciones practicas de los cambios.

Tubo de flama nuevo
Figura 5.8



La ignición resulto más provechosa, se observa una llama totalmente azul, parecida a la de las hornillas de gas de las cocinetas domesticas, pero con mucha vibración del mecanismo, tampoco se auto sostiene, pues si por cualquier motivo, una chispa se pierde, la llama se suspende. Se sospecha entonces, que se requiere modificar la turbulencia para obtener homogenización. La llama sale con demasiada fuerza y distancia fuera del combustor, es probable que haya que modificar también el inyector de combustible.

Forma de la llama
Figura 5.9



5.2.3 Tercera Prueba

Cambiando el tipo de inyector se tiene una notable diferencia de funcionamiento. Inicialmente se utilizó un modelo de 1/8 pulgada con salida cónica y difusor como se ve en la figura 5.8.

Inyector de combustible
Figura 5.8



Ahora se utilizara otro del mismo diámetro pero con su salida casi plana, lo que lo hace funcionar mejor. Nuevamente no se logra auto mantención de flama, pero permite un largo rango de presiones de combustible de entre 40 a 100 psi y no como inicialmente de aproximadamente 60 psi.

En los límites extremos de presión es en donde funciona de mejor manera, pero en los puntos medios es inestable y el combustor se calienta demasiado. Acusamos el problema a la ignición, aunque se ha tratado con varias bobinas de distintas características no se han observado variaciones.

Injectores de combustible
Figura 5.9



Observando la forma de la chispa, se nota que esta es débil, parece que la fuerza del soplador impide un buen arco. Reduciendo la presión a 38 psi se logro mantener de mejor manera la combustión, solo que la bujía y el tubo de flama se calientan tanto que comienzan a tornarse rojizos, por lo que se suspende este método pues nos encontramos al borde de fundir los materiales. En esta presión la salida de la llama no es tan lejana al combustor.

5.2.4 Cuarta prueba

Modificando la posición de la bujía para acercarla directamente a la salida del gas dentro de la cámara se consiguió el mejor resultado que puede determinarse como

final en base a los objetivos iniciales planteados. La llama se autosustenta por aproximadamente 4 minutos, tiempo suficiente para observar y evaluar las características de eficiencia de la maquina. Se puede apreciar por un simple método de observación de uno de los alabes en movimiento, una lámpara estroboscópica básica usualmente utilizada para visualizar el punto de encendido de los motores Otto, que el mecanismo gira a aproximadamente 620 rpm con un movimiento circular variable e irregular, resultado de varios aspectos. La temperatura de los materiales del turbocompresor y del aire de ingreso, aumenta considerablemente durante cada segundo de operación de la turbina, debido a que no se dispone de un mecanismo de refrigeración, lo cual pudiera implementarse para obtener resultados más favorables. Esta situación disminuye considerablemente el tiempo de funcionamiento esperado en mi hipótesis inicial, pero arroja conclusiones positivas para una futura mejora en caso de alguien considerar este experimento como base sustancial de hechos de prueba y error que puedan aplicarse a una nueva propuesta.

De esta manera, el resultado final de esta prueba fue un motor auto funcional de movimiento errático y por ende de potencia muy limitada pero que demuestra que fue factible modificar un turbocompresor clásico para convertirlo en una turbina de reacción que a criterio personal representa un gran conjunto de experiencias, conocimientos y resultados favorables a mi intención inicial.

CONCLUSIONES

Todos los mecanismos de control utilizados en la turbina han sido experimentales, y por tanto pueden ser apreciados desde distintos criterios y puntos de vista.

Mas los resultados prácticos obtenidos en todos y cada uno de los sistemas tanto adicionales a la turbina como funcionales de la misma han satisfecho los requerimientos básicos necesarios para su correcto funcionamiento, es decir el objetivo o hipótesis inicial de este proyecto ha sido cumplido.

A criterio particular del autor el proyecto demuestra pues que es posible fabricar un motor con componentes remanufacturados comunes encontrados en el mercado y que aplicando los conceptos básicos de funcionamiento de máquinas térmicas, termodinámica y resistencia de materiales es posible conseguir este propósito.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas:

- ABBOTT MICHAEL M. & VANNESS HENDRICK C., “Termodinámica”, Segunda Edición, 1991, México-México
/exec/obidos/tg/detail/-/156032841X?vi=glance”
- BOSCH
“Manual de la técnica del automóvil”, 18va edición, 1988, Barcelona – España.
- CAMERE,
“Berechnungen bei Francisturbinen”, 1ra edición, 1955, Trier – Alemania.
- CONSULTOR EDITORIAL ROBERT CECIL CMG , “Hitler, máquina de Guerra”, 1997, Madrid – España
- CRANE, “Mecánica de fluidos”, 4ta edición, 1988, México – México.
- DUBBEL, H., “Manual del constructor de máquinas”, 2da edición, 1968, Barcelona – España.
- HAMILL WILLIAM & WILLIAMS RUSSELL JR, “Química Física”, 1963, Barcelona-España
- LANGHAART, H. L., “Analyse dimensionelle”, 1ra edición, 1956, Paris – Francia.
- LUCINI, M., “Turbomáquinas de vapor y de gas”, 3ra edición, 1980, Montevideo – Uruguay.
- MARON SAMUEL H. & PRUTON CARL F., “Fundamentos de Fisicoquímica”, Decimosegunda reimpresión, 1980, México-México

- OCÉANO/CENTRUM, “Enciclopedia de la Mecánica, Ingeniería y Técnica”, 1ra edición, 1990, Barcelona -España
- QUANTZ, L, “Motores Hidráulicos”, 4ta edición, 1965, Barcelona – España.
- SAN JUAN, Rubio, “Elementos de hidráulica genera y aplicada con motores”, 5ta edición, 1960, México – México
- SHIGLEY, Joseph, “Diseño en ingeniería mecánica”, 5ta edición, 1990, México – México.

Referencias Electrónicas:

- AE 6011 TURBULENT FLOWS,
“www.ae.gatech.edu/graduate/semester/ae6440.pdf”
- AMAZON.COM: BOOKS: GAS TURBINE HEAT TRANSFER AND COOLING, “www.amazon.com”
- IPC S3 102 OIL AND GAS PROCESSES
“www.environment-agency.gov.uk/commondata/105385/ipcs3102.pdf”
- PAGINA DE TURBINAS, “www.lalaguna.com/juguer/paginadeturbinas.htm”
- ROTATING AN RECIPROCATING EQUIPMENT,
“www.resourcedev.com/Productos/eRotatingequip.htm”
- TURBINAS DE GAS
“www.texaco.com.co/productos/otros_prod/aplicaciones_ind/regalr&o.htm”
- TURBINAS DE VAPOR, “www.cec.uchile.cl/”

- TURBINE OIL AND LUBRICATION, “www.lube-tips.com”
- TURBINE, SCHAUKRAFTWERK SCHWILLOD
“www.museumonline.at/1998/schools/niederoe/no_waidh/spanisch/turbine/turbine.htm”

ANEXOS

Anexo 1.- Propiedades generales del G.L.P.

	Propano	Butano
Punto de ebullición °K, presión atmosférica	231.45	266.95
presión de vapor, kPa a 294.65°K	861.84	206.84
a 310.95°K	1516.84	482.63
Densidad relativa en estado líquido, a 288.75°K	0.5	0.58
en estado de gas (aire = 1)	1.5	2.0
Metro cúbico de gas a partir de 0.001 m ³ de líquido	0.27	0.23
A 288.75°K, 101.325 kPa		
Poder calorífico superior del gas saturado, MJ/m ³	93.15	119.32
Poder calorífico superior, MJ/kg	50.074	49.40
Calor latente en el punto de ebullición (presión atmosférica): kJ/kg		
MJ/ m ³	431.24	384.34
	213.52	223.57
Límites de inflamabilidad (% de gas en mezcla aire/gas)	2.0 a 9.5	2.0 a 8.5
Aire teórico para la combustión, m ³ aire/ m ³ gas	23	30
Temperatura de ignición, °K	772.15	755.15
Temperatura máxima de la llama en el aire °K	2203.15	2143.15

Anexo 2.- Propiedades del aire a bajas presiones

T , °R	h , Btu/lb	p_r	u , Btu/lb	v_r	ϕ Btu/(lb)(°R)	T , °R	h , Btu/lb	p_r	u , Btu/lb	v_r	ϕ Btu/(lb)(°R)
360	85.97	0.3363	61.29	396.6	0.50369	1460	358.63	50.34	258.54	10.743	0.84704
380	90.75	0.4061	64.70	346.6	0.51663	1480	363.89	53.04	262.44	10.336	0.85062
400	95.53	0.4858	68.11	305.0	0.52890	1500	369.17	55.86	266.34	9.948	0.85416
420	100.32	0.5760	71.52	270.1	0.54058	1520	374.47	58.78	270.26	9.578	0.85767
440	105.11	0.6776	74.93	240.6	0.55172	1540	379.77	61.83	274.20	9.226	0.86113
460	109.90	0.7913	78.36	215.33	0.56235	1560	385.08	65.00	278.13	8.890	0.86456
480	114.69	0.9182	81.77	193.65	0.57255	1580	390.40	68.30	282.09	8.569	0.86794
500	119.48	1.0590	85.20	174.90	0.58233	1600	395.74	71.73	286.06	8.263	0.87130
520	124.27	1.2147	88.62	158.58	0.59173	1620	401.09	75.29	290.04	7.971	0.87462
537	128.10	1.3593	91.53	146.34	0.59945	1640	406.45	78.99	294.03	7.691	0.87791
540	129.06	1.3860	92.04	144.32	0.60078	1660	411.82	82.83	298.02	7.424	0.88116
560	133.86	1.5742	95.47	131.78	0.60950	1680	417.20	86.82	302.04	7.168	0.88439
580	138.66	1.7800	98.90	120.70	0.61793	1700	422.59	90.95	306.06	6.924	0.88758
600	143.47	2.005	102.34	110.88	0.62607	1720	428.00	95.24	310.09	6.690	0.89074
620	148.28	2.249	105.78	102.12	0.63395	1740	433.41	99.69	314.13	6.465	0.89387
640	153.09	2.514	109.21	94.30	0.64159	1760	438.83	104.30	318.18	6.251	0.89697
660	157.92	2.801	112.67	87.27	0.64902	1780	444.26	109.08	322.24	6.045	0.90003
680	162.73	3.111	116.12	80.96	0.65621	1800	449.71	114.03	326.32	5.847	0.90308
700	167.56	3.446	119.58	75.25	0.66321	1820	455.17	119.16	330.40	5.658	0.90609
720	172.39	3.806	123.04	70.07	0.67002	1840	460.63	124.47	334.50	5.476	0.90908
740	177.23	4.193	126.51	65.38	0.67665	1860	466.12	129.95	338.61	5.302	0.91203
760	182.08	4.607	129.99	61.10	0.68312	1880	471.60	135.64	342.73	5.134	0.91497
780	186.94	5.051	133.47	57.20	0.68942	1900	477.09	141.51	346.85	4.974	0.91788
800	191.81	5.526	136.97	53.63	0.69558	1920	482.60	147.59	350.98	4.819	0.92076
820	196.69	6.033	140.47	50.35	0.70160	1940	488.12	153.87	355.12	4.670	0.92362
840	201.56	6.573	143.98	47.34	0.70747	1960	493.64	160.37	359.28	4.527	0.92645
860	206.46	7.149	147.50	44.57	0.71323	1980	499.17	167.07	363.43	4.390	0.92926
880	211.35	7.761	151.02	42.01	0.71886	2000	504.71	174.00	367.61	4.258	0.93205
900	216.26	8.411	154.57	39.64	0.72438	2020	510.26	181.16	371.79	4.130	0.93481
920	221.18	9.102	158.12	37.44	0.72979	2040	515.82	188.54	375.98	4.008	0.93756
940	226.11	9.834	161.68	35.41	0.73509						

T , °R	h , Btu/lb	p_r	u , Btu/lb	v_r	ϕ Btu/(lb)(°R)	T , °R	h , Btu/lb	p_r	u , Btu/lb	v_r	ϕ Btu/(lb)(°R)
960	231.06	10.610	165.26	33.52	0.74030	2060	521.39	196.16	380.18	3.890	0.94026
980	236.02	11.430	168.83	31.76	0.74540	2080	526.97	204.02	384.39	3.777	0.94296
1000	240.98	12.298	172.43	30.12	0.75042	2100	532.55	212.1	388.60	3.667	0.94564
1020	245.97	13.215	176.04	28.59	0.75536	2150	546.54	233.5	399.17	3.410	0.95222
1040	250.95	14.182	179.66	27.17	0.76019	2200	560.59	256.6	409.78	3.176	0.95868
1060	255.96	15.203	183.29	25.82	0.76496	2250	574.69	281.4	420.46	2.961	0.96501
1080	260.97	16.278	186.93	24.58	0.76964	2300	588.82	308.1	431.16	2.765	0.97123
1100	265.99	17.413	190.58	23.40	0.77426	2350	603.00	336.8	441.91	2.585	0.97732
1120	271.03	18.604	194.25	22.30	0.77880	2400	617.22	367.6	452.70	2.419	0.98331
1140	276.08	19.858	197.94	21.27	0.78326	2450	631.48	400.5	463.54	2.266	0.98919
1160	281.14	21.18	201.63	20.293	0.78767	2500	645.78	435.7	474.40	2.125	0.99497
1180	286.21	22.56	205.33	19.377	0.79201	2550	660.12	473.3	485.31	1.9956	1.00064
1200	291.30	24.01	209.05	18.514	0.79628	2600	674.49	513.5	496.26	1.8756	1.00623
1220	296.41	25.53	212.78	17.700	0.80050	2650	688.90	556.3	507.25	1.7646	1.01172
1240	301.52	27.13	216.53	16.932	0.80466	2700	703.35	601.9	518.26	1.6617	1.01712
1260	306.65	28.80	220.28	16.205	0.80876	2750	717.83	650.4	529.31	1.5662	1.02244
1280	311.79	30.55	224.05	15.518	0.81280	2800	732.33	702.0	540.40	1.4775	1.02767
1300	316.94	32.39	227.83	14.868	0.81680	2850	746.88	756.7	551.52	1.3951	1.03282
1320	322.11	34.31	231.63	14.253	0.82075	2900	761.45	814.8	562.66	1.3184	1.03788
1340	327.29	36.31	235.43	13.670	0.82464	2950	776.05	876.4	573.84	1.2469	1.04288
1360	332.48	38.41	239.25	13.118	0.82848	3000	790.68	941.4	585.04	1.1803	1.04779
1380	337.68	40.59	243.08	12.593	0.83229	3500	938.40	1829.3	698.48	0.7087	1.09332
1400	342.90	42.88	246.93	12.095	0.83604	4000	1088.26	3280	814.06	0.4518	1.13334
1420	348.14	45.26	250.79	11.622	0.83975	4500	1239.86	5521	931.39	0.3019	1.16905
1440	353.37	47.75	254.66	11.172	0.84341	5000	1392.87	8837	1050.12	0.20959	1.20129
						6000	1702.29	20120	1291.00	0.11047	1.25769
						6500	1858.44	28974	1412.87	0.08310	1.28268

Anexo 3.-Valores de la constante de los gases perfectos

Valores de R	Unidades
$8,317 \times 10^7$	ergs/(g-mol °K)
1,9872	cal/(g-mol °K)
8,3144	J/(g-mol °K)
0,082057	(litro atm)/(g-mol °K)
82,057	(cm ³ atm)/(g-mol °K)
62,361	(litro mm Hg)/(g-mol °K)
0,0848	(kg _f /cm ² litro)/(g-mol °K)
998,9	(mm Hg ft ³)/(lb-mol °K)
1,314	(atm ft ³)/(lb-mol °K)
1,9869	Btu/(lb-mol °R)
$7,805 \times 10^{-4}$	(hp hr)/(lb-mol °R)
$5,819 \times 10^{-4}$	(kw hr)/(lb-mol °R)
0,7302	(atm ft ³)/(lb-mol °R)
555	(mm Hg ft ³)/(lb-mol °R)
10,731	(psi ft ³)/(lb-mol °R)
1545	(lb _f -ft)/(lb-mol °R)
$1,851 \times 10^4$	(lb _f -in.)/(lb-mol °R)

Anexo 4.- Propiedades de fluidos de trabajo y gases de proceso típicos

Tabla 14-5. Propiedades de fluidos de trabajo y gases de proceso típicos^a

	Fórmula química	Masa (peso) molecular ^a M.M.	Punto de ebullición ^a 1 atm (K)	Densidad ^{a,b} @ ISA (kg/m ³)	Constante de gas R (= pV/T) 8.314.3/J/M	(C_p/C_v) @ ISA γ	Capacidad térmica específica ^{a,d} $C_p = a + b\gamma + c\gamma^2$ (J/kg K) donde $\gamma = \text{temp.} / 100$			n	Viscosidad dinámica ^a @ ISA, μ ($\text{cp} \times 10^3$)	Conductividad térmica ^a @ ISA (J/s m K)
							a	b	c			
Acetileno	C ₂ H ₂	26.04	189	1.1019	319.3	1.112	2188	376.7	-11.6	+2	9.90	0.0200
Aire	—	28.964	83	1.2256	287.1	1.399	947	21.3	-0.31	+2	18.00	0.0252
Amoníaco	NH ₃	17.03	240	0.7308	488.2	1.310	1746	147.4	-909	-2	9.65	0.0233
Argón	A	39.93	88	1.6908	208.2	1.666	521	0	0	—	21.87	0.0173
Bromuro de hidrógeno	HBr	80.92	206	3.4241	102.7	1.401	331	6.4	+77.6	-2	17.95	0.0083
Cianuro de hidrógeno	HCN	27.03	299	—	307.6	1.307	1457	41.8	-2229	-2	—	0.0117
Cloro	Cl ₂	70.91	236	3.0466	117.2	1.326	522	0.9	-401.2	-2	13.07	0.0083
Cloruro de hidrógeno	HCl	36.46	188	1.5428	228.0	1.397	720	14.2	+344.3	-2	13.98	0.0135
Dióxido de azufre	SO ₂	64.06	263	2.7107	129.8	1.269	721	12.3	-1202	-2	12.10	—
Dióxido de carbono	CO ₂	44.01	195	1.8761	189.0	1.296	1005	20.0	-1959	-2	14.57	0.0157
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	46.01	294	1.9469	180.7	1.295	916	20.7	-1519	-2	—	—
Disulfuro de carbono	CS ₂	76.13	319	—	109.2	1.227	684	8.8	-989	-2	9.67	0.0074
Etano	C ₂ H ₆	30.09	184	1.2720	276.4	1.192	313	531.5	-15.4	+2	8.94	0.0201
Etileno	C ₂ H ₄	28.07	169	1.1860	296.3	1.238	422	426.6	-13.0	+2	9.60	0.0194
Helio	He	4.00	4	0.1692	2078.6	1.666	5199	0	0	—	19.20	0.1473
Hidrógeno	H ₂	2.016	20	0.0853	4124.1	1.405	13532	161.9	+2491	-2	8.65	0.1816
Metano	CH ₄	16.05	109	0.6785	518.2	1.318	882	470.7	-11.2	+2	10.71	0.0327
Monóxido de carbono	CO	28.01	82	1.1853	296.9	1.400	1015	14.6	-164	-2	17.20	0.0242
<i>n</i> -Butano	C ₄ H ₁₀	58.17	273	2.4580	143.0	1.094	277	527.9	-16.3	+2	—	0.0149
Neón	Ne	20.18	27	0.8535	411.8	1.666	1030	0	0	—	30.76	0.0472
Nitrógeno	N ₂	28.02	77	1.1854	296.7	1.401	1020	13.4	-179	-2	17.25	0.0252
Oxígeno	O ₂	32.00	90	1.3530	259.8	1.399	936	13.1	-523	-2	19.90	0.0258
Óxido nítrico	NO	30.01	120	1.2704	277.1	1.387	980	12.8	-195	-2	18.50	0.0250
Óxido nitroso	N ₂ O	44.01	185	1.8748	188.9	1.281	1038	19.6	-1939	-2	14.25	0.0164
Propano	C ₃ H ₈	44.14	231	1.8650	188.4	1.129	229	542.5	-16.6	+2	7.90	0.0166
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	34.08	212	1.4410	244.0	1.325	959	36.3	-565	-2	12.33	0.0140
Vapor	H ₂ O	18.03	373	0.7620	461.1	—	1695	57.1	0	—	—	—

Anexo 5.- Factores de conversión de energía

	joules = 10 ⁷ ergs	kg _f m	ft-lb _f	kw hr	hp hr	litro atm	kcal	Btu	g cal
joules	1	0,102	0,738	$2,77 \times 10^{-7}$	$3,73 \times 10^{-7}$	$9,69 \times 10^{-3}$	$2,39 \times 10^{-4}$	$9,48 \times 10^{-4}$	0,239
kg _f m	9,80	1	7,23	$2,72 \times 10^{-6}$	$3,65 \times 10^{-6}$	$9,68 \times 10^{-2}$	$2,34 \times 10^{-3}$	$9,29 \times 10^{-3}$	2,344
ft-lb _f	1,36	0,14	1	$3,77 \times 10^{-7}$	$5,05 \times 10^{-7}$	$1,34 \times 10^{-2}$	$3,24 \times 10^{-4}$	$1,29 \times 10^{-3}$	0,324
kw hr	$3,6 \times 10^6$	$3,67 \times 10^5$	$2,66 \times 10^6$	1	1,34	$3,55 \times 10^4$	$8,61 \times 10^2$	$3,41 \times 10^3$	$8,61 \times 10^5$
hp hr	$2,68 \times 10^6$	$2,74 \times 10^5$	$1,98 \times 10^6$	0,746	1	$2,65 \times 10^4$	$6,42 \times 10^2$	$2,55 \times 10^3$	$6,42 \times 10^5$
liter atm	$1,01 \times 10^2$	10,3	74,7	$2,82 \times 10^{-5}$	$3,77 \times 10^{-5}$	1	$2,42 \times 10^{-2}$	$9,60 \times 10^{-2}$	24,2
kcal	$4,18 \times 10^3$	$4,27 \times 10^2$	$3,09 \times 10^3$	$1,17 \times 10^{-3}$	$1,56 \times 10^{-3}$	41,3	1	3,97	1×10^3
Btu	$1,06 \times 10^3$	$1,07 \times 10^2$	$7,78 \times 10^2$	$2,93 \times 10^{-4}$	$3,93 \times 10^{-4}$	10,4	0,252	1	$2,52 \times 10^2$
g cal	4,18	0,427	3,09	$1,16 \times 10^{-6}$	$1,56 \times 10^{-6}$	$4,13 \times 10^{-2}$	1×10^{-3}	$3,97 \times 10^{-3}$	1

† Para hallar un valor en unidades de la fila superior, tómese el valor que se tenga en unidades de la columna izquierda y *multiplíquese* por el número de la casilla correspondiente a esa fila y a esa columna. Ejemplo: Btu $\times$ 778 = ft-lb_f.

Anexo 6.- Reacciones de combustión generales de gases y productos resultantes.

COMPONENTE	Reacción de combustión	M. ³ POR M. ³ DE COMPONENTE			
		O ₂ re-querido	N ₂ del aire	CO ₂ formado	H ₂ O formado
Oxígeno, O ₂	Carburante.	»	»	»	»
Dióxido de carbono, CO ₂ ..	Ninguna.	»	»	»	»
Hidrocarburos, C _m H _n (C ₃ H ₆)	$2C_3H_6 + 9O_2 = 6CO_2 + 6H_2O$	4,5	17,01	3	3
Monóxido de carbono, CO ...	$2CO + O_2 = 2CO_2$	0,5	1,89	2	»
Hidrógeno, H ₂	$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	0,5	1,89	»	1
Metano, CH ₄	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	2	7,56	1	2
Nitrógeno	Ninguna.	»	»	»	»

Anexo 7.- Composición del aire atmosférico

Componente	% Volumen en columna
Nitrógeno	78.08
Oxígeno	20.98
Bióxido de carbono	0.0314
Metano	0.00015
Hidrógeno	0.00005
Monóxido de carbono	0.00001
Ozono	0.000002
Dióxido de Nitrógeno	0.0000001
Dióxido de carbono	0.00000002
Varios	0.90838788