

BANCO DE PRUEBAS DE UN TURBOJET A PARTIR DE UN TURBOCARGADOR

Recepción:
Junio 15 de 2010

Aprobación:
Septiembre 17 de 2010

¹Harold A. Rodríguez A., ²Jhon E. Barbosa J., ³Eder N. Florez S.

1. Programa de Ingeniería Mecatrónica, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia

2. Universidad Nacional Abierta y a Distancia- UNAD, CEAD, Pamplona, Colombia
harodriguez@unipamplona.edu.co

3. Dpto. Ingeniería Mecánica, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña- UFPSO, Ocaña, Colombia

Resumen

Los turbojet son utilizados para la fuerza de empuje por medio del calentamiento del aire en ciclos termodinámicos simples, su uso se aplica en diferentes medios como turbinas para generadores y barcos, por lo tanto es necesario llevarlos al aula de clase por medio de laboratorios, donde la teoría se refuerza con la práctica. El diseñar y construir este banco permite la creación de un laboratorio de turbojets y crear un espacio adecuado para realizar prácticas, simulando de forma casi real un turbojet, teniendo características y comportamientos muy similares a las turbinas reales, aunque realmente se utilizó un turbocargador para su construcción, dando buenos resultados como base experimental para posteriores trabajos.

Palabras clave:

Simulación, turbinas, turbocargador, turbojet.

Abstract

The turbojet is used to the driving force in different media, such as turbines for generators, boats etc., By warming the air in simple thermodynamic cycles, it is necessary to bring to the classroom through laboratory where theory is reinforced by practice. The design and build the bank allows the creation of a laboratory of turbojets and creating a space that allows simulating practical real almost a turbojet, with very similar characteristics and behaviors in real turbines, although what was used was a turbocharger to create one, gave good results as a basis for further experimental work.

Key words:

Simulation, turbines, turbochargers, turbojet

Introducción

Una turbina se emplea para accionar diferentes tipos de aparatos, por ejemplo, generadores eléctricos, bombas, compresores, para impulsar hélices de barcos, a través de mecanismos adecuados que se diseñan para operar. Una turbina consta de tres elementos básicos que son: compresor, una o más cámaras de combustión y una turbina que esta unida con un eje común al compresor (Avallone, 1995).

Los turbocargadores se utilizan para obligar a entrar a los cilindros del motor una masa de aire mayor que la que es posible con la sola presión atmosférica. Esa masa mayor de aire suministra más oxígeno para la combustión, lo cual permite quemar más combustible en la cámara de combustión, con lo que el motor aumenta su potencia entre un 25 y 40%. Un turbocargador consiste básicamente en un compresor montado en el mismo eje que una turbina impulsada por los gases de escape del motor (Elonka, 1989).

Al comparar los componentes básicos de estas dos máquinas se pudo deducir que un turbocargador es muy semejante a un turbojet, es decir, solo le haría falta (al turbocargador), algunos elementos como la cámara de combustión, el sistema de lubricación y el sistema de encendido para llegar a ser semejante a un turbojet.

Atendiendo a lo anterior, con este trabajo se buscó construir y adaptar los elementos faltantes al turbocargador para su transformación en turbojet. Esto llevó al diseño y construcción de un banco de pruebas para el turbojet en mención, que permitirá hacerle pruebas y mediciones como: consumo de combustible, revoluciones por minuto (rpm), temperaturas, presiones, etc.

Parte Experimental

CONSTRUCCIÓN DE UN TURBOJET A PARTIR DE UN TURBOCARGADOR

Después de haber estudiado el funcionamiento, y atendiendo a las recomendaciones dadas por los ingenieros expertos en el funcionamiento, mantenimiento, seleccionamiento y reparación de turbocargadores, se decidió por un turbocargador de gran capacidad, en cuanto a caudal de aire se refiere, pues esto facilitaría la construcción de la cámara de combustión, esto llevo a seleccionar un turbocargador con las siguientes especificaciones:

- Marca: GARRETT
- Modelo: HT3B
- P/N: 144402-0000
- S/N: AHP0022
- C/C: 144490-1
- C/T: 9705

Ya que se requiere de algunos datos técnicos para la construcción del equipo se vio la necesidad de construir laboratorios experimentales para la toma de datos de diseño geométrico de la cámara de combustión.

CÁLCULO DEL CAUDAL DEL TURBOCARGADOR: Para este cálculo sé tiene en cuenta la cantidad de aire enviado por el compresor del turbocargador con respecto a las r.p.m.. Se realizo un laboratorio el cual dio la información necesaria para obtener la curva de R.P.M. Vs. Q del compresor. Pues se desconocía completamente la cantidad de caudal enviado por el compresor del turbocargador.

CÁLCULO DE LA CURVA DE QA VS. R.P.M DEL COMPRESOR: Se trató de obtener la curva característica del compresor por medio del fabricante y del importador, pero no fue posible. Por este motivo fue necesario montar un laboratorio para determinar los valores del caudal de acuerdo a las r.p.m. del turbocargador.

El laboratorio se realizó de la siguiente manera: Se acondicionó el turbocargador sobre una estructura de acero construida en ángulo para sostenerlo, como se observa en la figura 1, se

construyó una boquilla para la salida de aire a presión proveniente de un cilindro, el cual golpeaba de manera tangencial la turbina proporcionando la energía necesaria para que el compresor suministrará un caudal.

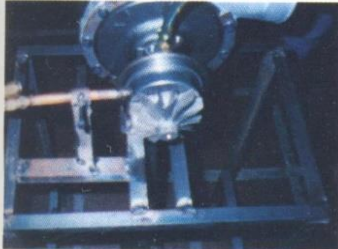


Fig. 1. Montaje de laboratorio para la curva de Qa Vs R.P.M.

También se instaló un sistema de lubricación provisional, se colocó un galón a una altura aproximada de 2.50 mts el cual contenía el lubricante, este circulaba a través de los ductos de lubricación del turbocargador. Para variar la velocidad del turbocargador y así poder cambiar el flujo de aire, se ajustaba la presión de salida del aire que suministraba la boquilla y para mantenerla constante se utilizó un regulador de presión. Fueron necesarios dos cilindros de aire comprimido para la realización del laboratorio.

prueba nº	presión de salida (psi)	r.p.m	Recorrido (ft)	tiempo seg	caudal m³/seg
1	110	501,8	15	10,31	0,00359503
2	90	586,8	14	10,24	0,0033783
3	100	603,6	17	10,1	0,00415908
4	110	723,2	23	10,25	0,00554465
5	120	970,9	32	10,06	0,00785999
6	130	1146	42	10,08	0,01029577
7	140	1260	44	10,07	0,01079675
8	150	1361	51	10,31	0,0122231
9	185	1389	58	10,26	0,01396853
10	160	1548	58	10,11	0,01417578
11	160	1572	61	10,24	0,01471973
12	170	1667	62	10,21	0,015005
13	180	1715	67	10,24	0,01616757
14	190	1759	69	10,14	0,01681439
15	200	1839	74	10,17	0,01797963

Tabla 1. Datos recolectados para la curva inicial de Qa Vs R.P.M.

se repitió varias veces con el fin de obtener los datos suficientes, y se muestran en la tabla 1.

A la salida del compresor se colocó un anemómetro para medir el recorrido del aire en un tiempo aproximado de 10 segundos. Esto con el fin de medir la velocidad del aire y teniendo el área de salida se calculaba el caudal. Simultáneamente se midieron las r.p.m. con un tacómetro digital. Este proceso

Como no se puede llegar a altas velocidades como de 25.000 r.p.m. Para solucionar este inconveniente se utilizaron todos los datos haciendo una serie de curvas y de ajustes para encontrar la ecuación ideal que daría la relación r.p.m Vs Qa.

Como no se puede llegar a altas velocidades como de 25.000 r.p.m. Para solucionar este inconveniente se utilizaron todos los datos haciendo una serie de curvas y de ajustes para encontrar la ecuación ideal que daría la relación r.p.m Vs Qa.

La ecuación que se ajusta a esta tabla es:

$$Q_a = 1 \times 10^{-8} (R.P.M)^2 - 0,0006 (R.P.M) - 0,1326 \quad (1)$$

$$R^2 = 0,9905$$

Este R² nos dice que hay una relación buena entre variables.

De acuerdo a (1) se calculó cual sería el caudal para una velocidad de rotación de 25.000 r.p.m, pues se pensó inicialmente que esta era la velocidad promedio de trabajo de la turbina, y dio como resultado (2).

$$Q_a = 21,11 \text{ m}^3/\text{min.} \quad (2)$$

Este R² nos dice que hay una relación buena entre variables.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN:

La cámara de combustión consta de tres partes que son [3]:

- Carcaza.
- Mezclador.
- Quemador.

CARCAZA.: Esta a su vez consta de las siguientes partes que son:

1. Cuerpo de la cámara.
2. Conducto de entrada del aire.
3. Conducto de escape.
4. Mirilla.
5. Tapa.
6. Base.

Para diseñar el CUERPO DE LA CÁMARA de combustión se decidió tomar como base el caudal de 21,11 m³/min porque se estimó que este sería el caudal promedio de trabajo del turbojet.

Teniendo en cuenta que el tiempo de permanencia de los gases en las cámaras de combustión de las turbinas está por el orden de milisegundos, se decidió tomar como referencia el tiempo de permanencia de los gases que se presentan en la cámara de combustión del Banco de pruebas para turbocargadores de una empresa en Colombia.

Se calculo el volumen de esta cámara de combustión y teniendo el caudal se obtuvo el tiempo de permanencia:

$$t = 1,63673040210^{-2} \text{ seg.} \quad (4)$$

Con este tiempo y el caudal Qa, se calculó el volumen necesario para la carcasa de la cámara de combustión del turbojet de la siguiente manera:

$$V = t \times Q \quad (5)$$

donde

V = volumen de la cámara de combustión.(m³)

t = tiempo de permanencia. (seg)

Q = caudal de gases

$$V = 5,75856313 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (6)$$

Yateniendoeste volumen se procedió adimensionar la carcasa y a darle su forma geométrica de acuerdo a la disposición del turbocargador Fig. 4.

CONDUCTO DE ENTRADA DE AIRE (Greene, 1995). para esto se construyeron seis modelos a escala 1:1 de la cámara de combustión con el fin de saber cual era la mejor disposición de entrada, ya que no se sabía en que ángulo debía entrar el aire y tampoco en que parte del cuerpo de la cámara debía ser esta entrada(el medio, arriba o abajo). Lo único que se tenía claro era que la entrada debía ser tangencial al cuerpo de la cámara de combustión.

Todo esto para lograr una máxima eficiencia en la cámara de combustión y el óptimo consumo de combustible.

De los modelos se escogió el que tiene una entrada de aire en la parte superior, con un ángulo de 45°, tangencial al cuerpo de la cámara de combustión [5].



Fig. 2. Cámara de combustión.

CONDUCTO DE ESCAPE. Este conducto es por donde salen los gases de la combustión hacia la turbina. Debido a que la entrada al caracol de la turbina es rectangular y el cuerpo de la cámara de combustión es circular se diseño este conducto de tal forma que hubiese un perfecto acople entre las partes anteriormente mencionadas.

MATERIALES DE LA CARCAZA. Sabiendo que uno de los limitantes para la selección de materiales para la construcción de la misma, se decidió realizar pruebas a varios materiales hasta que se seleccionaron dos a los cuales se le practicaron pruebas, de temperatura y presión con equipos de la universidad, y con la asesoría de profesionales en el área, se tomó la decisión de construir la carcasa de la cámara con acero de oleoducto que fue el más resistente, pues se dedujo que la temperatura en las paredes de la misma no llegarían hasta valores críticos y no se presentaría descarbonización, como se ve en la figura 2, ya que estas son refrigeradas por el aire proveniente del compresor del turbojet y las temperaturas más altas serán soportadas por el mezclador del cual se hablará más adelante figura 2.

MIRILLA. Es un tubo soldado en la parte media exterior de la carcasa. En su parte superior se adecuaron dos vidrios de 10 mm cada uno los cuales a su vez se alojan en una tapa portavidrios roscada al tubo y con sello hermético, visto en la figura 3.



Fig. 3. Mirilla.



Fig. 4 Tapa, Porta bujías, Base

Esta mirilla se hizo con el fin de poder observar el estado y color de la llama y así optimizar la combustión.

TAPA: Es un plato el cual sirve como alojamiento a los portabujías y a la boquilla, figura 4. También en este descansa el mezclador. Está unida al cuerpo de la cámara por medio de seis pernos y entre estas

va alojado un empaque de asbesto para asegurar su hermeticidad.

PORTABUJÍAS (Miralles, 1994). Son dos cilindros huecos de acero inoxidable con rosca interna en la parte superior de los mismos. Estos sirven como su nombre lo indica de alojamiento a las bujías de encendido, en la figura 4.

BASE. Es un disco que se encuentra soldado alrededor del conducto de escape que cumple con el fin de sujetar la cámara de combustión a la estructura del banco de pruebas por medio de cuatro pernos, visto en la figura 4.

MEZCLADOR (Nortesantandereana de Gases, 1995): El mezclador es una pieza tubular de acero inoxidable de 25 cm de alto, 8 cm de diámetro y 8 mm de espesor, Figura 5, construido con una serie de agujeros radiales alrededor de su superficie. Su función es asegurar la distribución perfecta y uniforme del aire en toda la cámara de combustión, evitando chorros de aire que apaguen la llama. La combustión de la mezcla se realiza en su interior y los productos de la combustión se dirigen hacia el conducto de escape.



Fig. 5 Mezclador

Después de haber investigado en varios textos especializados en el tema y de tener en cuenta la disposición que se tiene en la carcasa, se decidió optar por la geometría que se tiene en este momento.

Para la distribución, dirección y dimensionamiento de los agujeros se tuvo en cuenta:

- El área total que suma los agujeros debe ser igual o mayor al área del conducto de entrada de aire a la carcasa, con el fin de reducir la resistencia al flujo que entra al mezclador y que no se produzca la recirculación del aire entre la carcasa y el mezclador.

- Para lograr un mejor direccionamiento del flujo dentro del mezclador y conseguir la formación del ciclón dentro del mismo, los agujeros fueron hechos con un ángulo de 45° con respecto al radio, ubicándolos estratégicamente alrededor del mezclador con las dimensiones adecuadas, dando como resultado que los agujeros de unas hileras tengan mayor diámetro que otros, esto con el fin de asegurar que en la parte baja del mezclador halla más flujo de aire, para que la mezcla con el combustible sea mejor.

QUEMADOR: Es un elemento construido por dos partes fundamentales: el cuerpo y el dispersor, manufacturados en acero inoxidable. Cumplen con la función de inyectar el combustible (gas propano) dentro del mezclador, Figura 6.



Fig. 6. Dispersor de la boquilla de combustible

PUESTA EN FUNCIONAMIENTO Y PRUEBAS DEL TURBOJET.

Después de ensamblar todos los sistemas y tener completamente armado el turbojet el grupo de trabajo procedió a encenderlo. Se encendió el sistema de lubricación, y se prendió la turbina, para esto se precalentó el aceite a una temperatura de 40°C. Después de 15 minutos se apagó el ventilador y se dejó que los gases de combustión realizaran el trabajo visto en la figura 12.



Fig. 7. Turbojet en el momento del encendido

Posteriormente se siguió trabajando para ajustar el turbojet y se llegó a la conclusión de que había que precalentar el aceite entre 65°C y 70°C. Además el ventilador se debería apagar en un tiempo de 5 min aproximadamente teniendo en cuenta que el turbojet debe estar girando a una velocidad de 25.000 R.P.M aproximadamente y tener un sonido característico.

Discusión y Resultados

Aquí solo se mostrara a la ecuación de R.P.M Vs. Q_a ya y lo mas importante se creo la guía de laboratorio siendo uno de los pocos laboratorios de turbojets en el país

La ecuación que se ajusta a esta curva es:

$$P_3 = 1 \times 10^{-10} P_2^2 + 0,5968 P_2 + 39276 \quad (7)$$

$$R^2 = 0,9968 \quad (8)$$

Donde P_2 y P_3 son presiones absolutas y están dados en Pascales (Pa)

Donde R^2 indica el grado de relación que existe entre las dos variables. El mayor grado de relación es $R^2 = 1$. Esto nos quiere decir que la relación existente entre estas dos variables (P_2 y P_3) es buena.

Agradecimientos

A las empresa DIESEL Y TURBOS, CRYOGAS, a las instituciones universidad Francisco de Paula Santander, SENA y a todas las personas que contribuyeron al desarrollo de este proyecto.

Conclusiones

- Un turbocargador se puede convertir en turbina diseñando elementos y adaptando los sistemas necesarios para su funcionamiento como lo son: la cámara de combustión, el sistema de lubricación, encendido, y suministro de combustible. Logrando así la construcción de un banco de pruebas para turbojet para la materia de Turbomáquinas Térmicas del pensum de Ingeniería Mecánica, con el fin de llevar lo teórico a la practica.

- Para obtener velocidades superiores a 30.000 r.p.m. se debe aumentar la presión de salida de combustible a más de 10 Psi lo que conlleva a que la turbina presente explosiones, debido a que el GLP a estas presiones se condensa y sale en forma de gotas.

- Con el fin de disminuir la viscosidad y en consecuencia el torque de arranque, la temperatura mínima del aceite a la entrada de la turbina debe oscilar entre los 65° y 70°C. para un mejor arranque y funcionamiento.

- El GLP como combustible para el turbojet es aceptable como fuente energética para las turbinas, pues las emisiones que desprenden están



dentro de los rangos aceptados en la legislación ambiental.

- La presión a la salida de la turbina es igual a la presión atmosférica, lo cual nos dice que el empuje del turbojet está dado solo por el cambio de momentum. Esto debido a que existe una baja relación de presiones en el compresor.

- El trabajo producido por la turbina es apenas suficiente para operar el compresor. Lo que quiere decir que es un generador de gas.

Referencias

- [1] AVALLONE, Eugene A. Manual del Ingeniero Mecánico. Mc Graw Hill. 9ª Edición, Naucalpan de Juárez, Estado de México. 1995, p. 7.20 – 7.28, 9.132 – 9.138, 16.10 – 16.28
- [2] ELONKA, Stephen. Operación de plantas industriales: preguntas y respuestas. Mc Graw Hill. 2ª edición. Delegación Iztapalapa, México. 1989, p. 233 - 252
- [3] WEBB, Maurice. Manual para técnicos en mecánica industrial. Mc Graw Hill. 2ª edición. Delegación Iztapalapa, México. 1989, p. 1.1 – 9.19.
- [4] GREENE, Richard. Compresores selección, uso y mantenimiento. Mc Graw Hill. 1ª edición. Naucalpan de Juárez, Edo. de México. 1995, p. 243 - 248.
- [5] MACINES, Hugh. Manual de turbocargadores. Prentice-hall Hispanoamericana. 1ª edición, Naucalpan de Juárez, Edo. de México. 1994, p.1 - 171.
- [6] MIRALLES, Juan. Turbo sobrealimentación de motores rápidos. Ediciones CEAC. 2ª Edición, Barcelona. 1984, p. 5 - 253.
- [7] NORTESANTANDEREANA DE GASES. Manual de inducción.. 1ª Edición, Cúcuta, Norte de Santander: NORGAS S.A. 1995, p. 1-59.
- [8] COASTAL VIDEO COMMUNICATIONS CORPORATION. La seguridad en caso de fuego. Coastal video communications corporation. 1ª edición, Estados Unidos. 1995, p 1 – 15.