

# **Diseño y construcción de micro-turborreactor de bajo costo y banco de ensayos**

Pedrotti, Pablo

Bustamante, José

## **1. Introducción**

A lo largo de la última década se han producido importantes avances en el desarrollo de turborreactores en el país. Esto en gran parte fue impulsado por la necesidad de independizarse de los pocos grandes fabricantes de turbomáquinas, paso inequívoco en el camino a la independencia industrial nacional. Si se desarrolla satisfactoriamente esta tecnología, se tendría la capacidad de producir máquinas que poseen una excelente capacidad de generación de energía, con un peso muy reducido y una gran polivalencia en el uso de combustibles verdes, siendo una segura solución a los problemas energéticos del país actuales y futuros.

Un turborreactor se compone de tres órganos principales: el compresor, la cámara de combustión y la turbina, siendo la cámara de combustión el menos conocido y a la vez el más importante de los tres. Esto se debe a que no se dispone, ni se conoce de forma analítica los fenómenos ocurridos dentro de esta pieza. Allí suceden reacciones químicas, fenómenos aerodinámicos y cambios de estado que son muy difíciles de modelizar matemáticamente y por lo general, se acaba diseñando de manera experimental, con eficiencias mediocres.

**Palabras claves:** combustión, micro-turborreactor, banco de ensayos

## **2. Objetivos**

Disponer de un turborreactor para desarrollar, perfeccionar y ensayar las bases teóricas y analíticas del diseño de cámaras de combustión, ensayar bio-combustibles desarrollados en el país y fortalecer el crecimiento de la tecnología que comprenden las turbomáquinas térmicas. Construir un micro-turborreactor totalmente funcional con los limitados recursos que se poseen en el país. De ahí que, surge la necesidad de desarrollo y construcción del

banco de ensayos, soporte fundamental para verificar y validar el diseño y funcionamiento del motor. Un antecedente de esta clase de micro-turborreactores de bajo costo data de 1976, construido por la firma Garrett-AiResearch modelo ETJ 131 (ver figura 1).

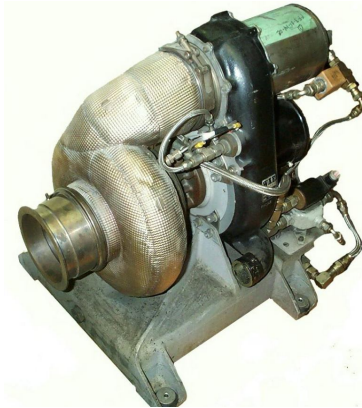


Figura 1. Micro-turborreactor de bajo costo construido por Garrett-AiResearch en el año 1976.

### **3. Metodología**

El micro-turborreactor, llamado TJ1, consta de 2 órganos principales: un turbocompresor marca Garrett y una cámara de combustión diseñada según los principios y teorías expuestos en el proyecto integrador “Definición de metodología de cálculo para cámaras de combustión de turborreactores y aplicación a microturbina de gas experimental”. El turbocompresor consta de una etapa de compresión (compresor) y otra de expansión (turbina), solidarias a un mismo eje soportado sobre cojinetes de bronce lubricados por película de aceite, ver figura 2.

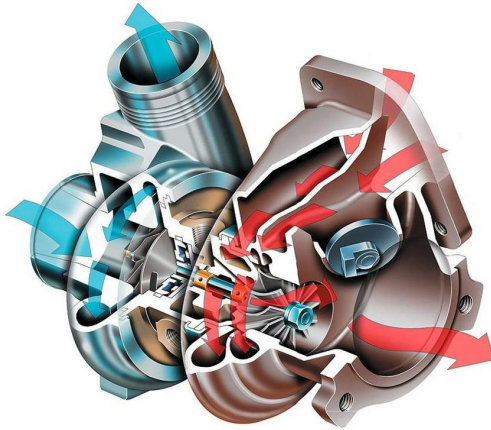


Figura 2. Turbocompresor automotriz marca Garrett.

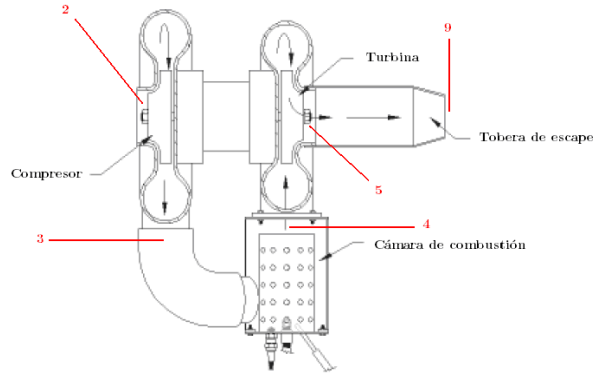


Figura 3. Estaciones del micro-turborreactor TJ1.

La etapa de compresión esta compuesta por un rotor centrífugo de álabes retrocurvados mecanizado en una aleación de aluminio 2024 T3, y un difusor en espiral fundido en aluminio. La etapa de expansión consta de una tobera convergente tipo espiral de doble entrada y un rotor centrípeto, ambas piezas realizadas en fundición de Inconel718. Como sistemas auxiliares al motor se pueden nombrar: sistema de lubricación con filtro e intercambiador de calor, sistema de combustible gaseoso, sistema de encendido por bobina y bujía, y sistema electrónico de adquisición de datos. Es importante destacar que el combustible a utilizar actualmente es una mezcla de gas propano/butano embasado en un recipiente a aproximadamente  $12\text{kg/cm}^2$ , pero remitiéndonos a uno de los objetivos más importantes del proyecto, la utilización de biocombustibles líquidos es la meta a alcanzar.

El modo de funcionamiento del micro-turborreactor es el siguiente (ver figura 3): El aire es captado por el difusor de entrada (estación 2), el que fluye de manera continua hacia la entrada del compresor. Allí, el compresor modifica el estado termodinámico del aire aumentando su temperatura y presión ( $2.6\text{ kg/cm}^2$  y  $140\text{ °C}$  aproximadamente) orientándolo hacia la cámara de combustión (estación 3). Los gases originados en la cámara de combustión, a elevada presión y temperatura ( $700\text{ °C}$ ), pasan a la turbina (estación 4). La función de la turbina es expansionar el fluido, a fin de extraer de éste una cierta cantidad de energía y hacer funcionar el compresor. La energía remanente (estación 5), que posee el gas cuando sale de la turbina, se emplea para producir el empuje del TJ1.

En la tabla 1, se pueden observar los datos técnicos del micro-turborreactor.

Tabla 1.

<b>Especificaciones técnicas micro-turboreactor TJ1 (ISA, sea level)</b>	
Tipo de turboreactor	Turbojet de eje único, compresor centrífugo, turbina centrípeta y cámara de combustión tubular.
Relación de compresión	2,6:1
Régimen de giro nominal	96000 rpm
Régimen de ralentí	30000 rpm
Empuje	5,73 kgf (56N)
Turbine Inlet Temperature	700°C
Exhaust Gas Temperature	530°C
Caudal másico de aire	0,19 kg/s
Consumo específico de combustible	61,61 mg/N.s
Empuje específico	296 N.s/kg
Voltaje sistema eléctrico	12 V
Combustible	Gas Propano/Butano
Lubricante	SAE 10W40
Capacidad de lubricante	3 L

#### 4. Proceso de diseño de la cámara de combustión

El primer paso fue encontrar el punto de funcionamiento óptimo del turbocompresor; con la ayuda del mapa del compresor (figura 4). Este punto se seleccionó en función del rendimiento del compresor, con una relación de compresión de 2.6:1 y un caudal másico de 0.19 kg/s de aire a 96000 rpm.

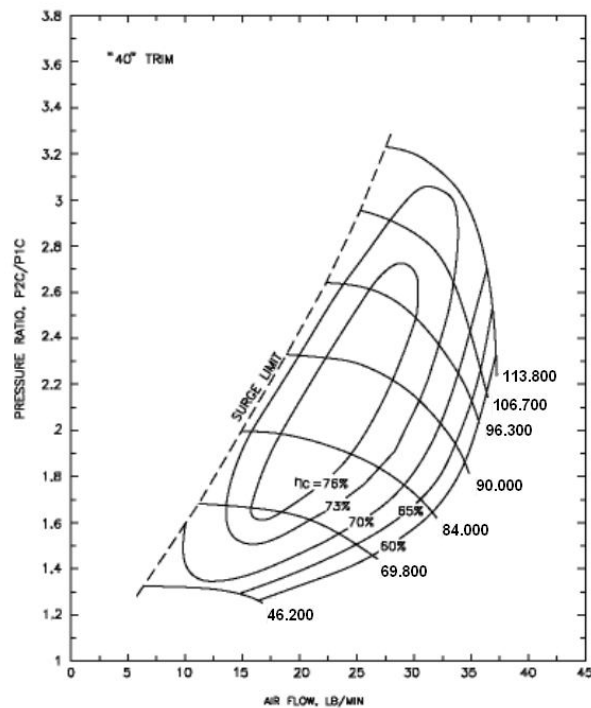


Figura 4. Mapa del compresor centrífugo Garrett.

Un vez encontrado este punto se analizó el ciclo ideal (sin pérdidas) y el ciclo real (con pérdidas) de un turbojet simple de eje único, que llegó a las curvas de consumo específicos y empuje específicos, a partir en función de la relación de compresión (ver [-] capítulo 5 “Ideal Cycle Analysis” y capítulo 7 “Nonideal Cycle Analysis”). Las ecuaciones para el cálculo de los consumos y empujes específicos tienen las siguientes fórmulas:

**Consumo específico:**

$$\text{Ideal } f = \left( \frac{C_p T_0}{h} \right) (\tau_\lambda - \tau_r \tau_c) \longrightarrow S = \frac{\dot{m}_f}{F} (10^6) = \frac{f}{F/\dot{m}} (10^6)$$

$$\text{Real } f = \frac{\tau_\lambda - \tau_r \tau_c}{\left( \frac{h \eta_b}{C_{pc} T_0} \right) - \tau_\lambda} \longrightarrow S = \frac{\dot{m}_f}{F} (10^6) = \frac{f}{F/\dot{m}} (10^6)$$

**Empuje específico:**

$$\text{Ideal } \frac{F}{\dot{m}} = a_0 \left\{ \left[ \frac{2\tau_r}{\gamma-1} \left( \frac{\tau_\lambda}{\tau_r \tau_c} - 1 \right) (\tau_c - 1) + \frac{\tau_\lambda}{\tau_r \tau_c} M_0^2 \right]^{1/2} - M_0 \right\}$$

$$\text{Real } \frac{F}{\dot{m}} = a_0 \left[ (1+f) \left( M_0 \frac{u_9}{u_0} \right) - M_0 + (1+f) \frac{1}{\gamma_c \left[ M_0 \frac{u_9}{u_0} \right]} \frac{T_9}{T_0} \left( 1 - \frac{P_0}{P_9} \right) \right]$$

Donde f es la relación combustible/aire, h el poder calorífico del combustible,  $C_p$  el calor específico del aire, S el consumo específico de combustible, F el empuje,  $\dot{m}$  y  $\dot{m}_f$  los caudales máxicos de aire y combustible,  $M_0$  el número de mach del flujo sin perturbar,  $u_9$  y  $u_0$  la velocidades del aire en las respectivas estaciones, y  $\tau_\lambda$ ,  $\tau_r$  y  $\tau_c$  relaciones de temperaturas de máximo salto entálpico en la turbina, de impacto y del compresor respectivamente.

A continuación, se obtienen los valores de presión y temperaturas totales en cada estación del motor (Ver figuras 3 y 5).

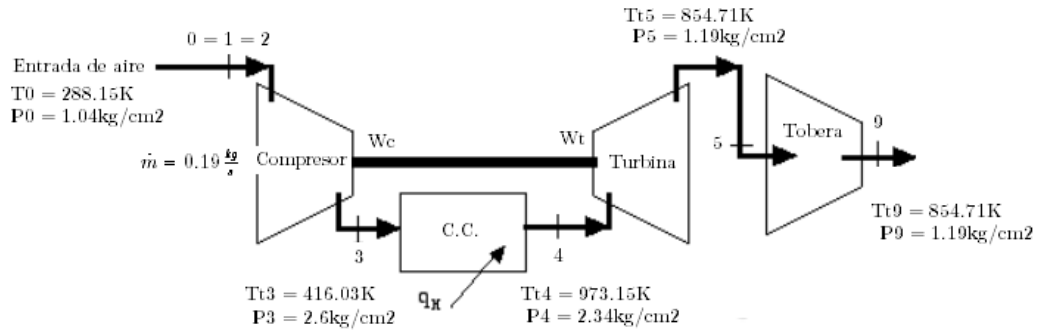


Figura 5. Valores de presiones y temperaturas en cada estación del TJ1.

El siguiente paso es abordar el diseño de la cámara de combustión. Con el valor del caudal másico y las ecuaciones de estado y continuidad, se calculan las áreas de pasaje de cada estación de la cámara (Ver figura 6).

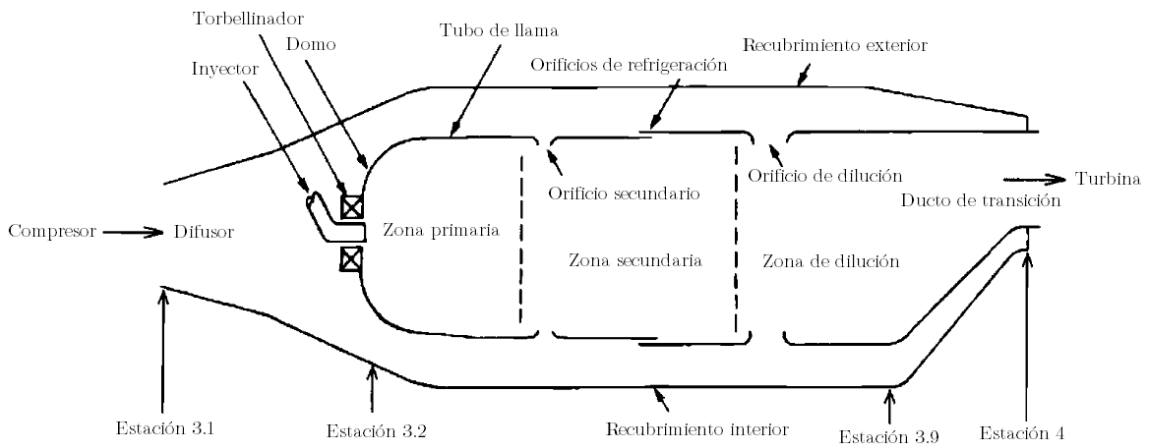
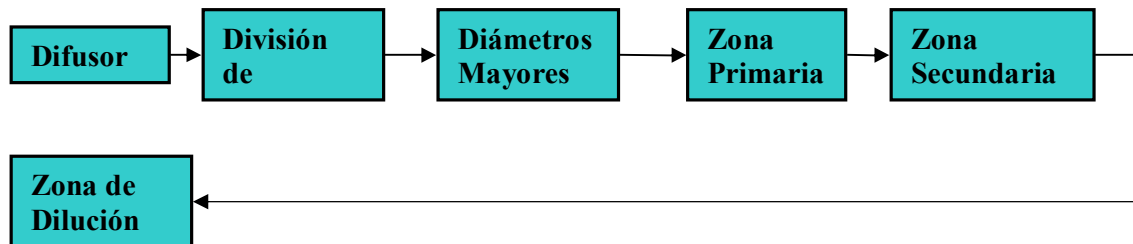


Figura 6. Subestaciones de una cámara de combustión típica.

Aquí es muy importante definir correctamente la velocidad de referencia en la estación 3.2 ya que esta es la que determina el tamaño de la cámara, en este caso se definió en 30 m/s. Una vez definida esta velocidad la secuencia de diseño es la siguiente:



Cabe destacar, que el diseño es un proceso iterativo en el que se debe tener en cuenta los diámetros de caños comerciales y así rediseñar de acuerdo con estos.

### **Proceso de construcción del micro-turborreactor y la cámara de combustión**

El primer paso fue construir el chasis soporte del motor, que luego serviría de cuna para los sistemas accesorios, de adquisición de datos y el panel de control. Este chasis fue soldado con electrodos revestidos y caños 20x40 de acero estructural. Una vez construido, se diseñó el diagrama del sistema de lubricación y se ensambló.

Luego, se procedió a la construcción del panel de control cortado por láser en MDF, diseño y ensamble del sistema eléctrico y desarrollo del sensor de régimen de giro y temperatura EGT. Paralelo a esto, se construyó la cámara de combustión de acuerdo a los planos pertinentes. El material seleccionado para su construcción fue tubos con costura de acero inoxidable AISI 304 y el proceso fue por soldadura TIG con electrodo de Tungsteno-Torio y material de aporte AISI 310. Es importante destacar el dificultoso proceso de soldadura, ya que los tubos y chapas utilizadas no poseen más de 1 mm de espesor. El torbellinador fue cortado por chorro de agua y luego doblado según ángulo correspondiente y soldado por punto (ver figuras 7, 8 y 9).

Una vez terminada la cámara de combustión, el siguiente paso será la instalación en el turbocompresor, ensamblar el sistema de combustible y verificar el correcto funcionamiento del sistema de adquisición de datos del banco de ensayos. Finalmente realizaremos pruebas monitoreando la temperatura de los gases de escape (EGT), régimen de giro y relación de compresión.

## **5. Resultados esperados**

Debido al proceso de diseño teórico de la cámara de combustión tubular, es muy probable que los rendimientos en este órgano del motor sean más bajos que los esperados, a su vez se esperan pérdidas de presión mayores que las calculadas. Se plantea que el rendimiento de la cámara sea de un 88% (se entiende por rendimiento como la relación entre la cantidad de energía que posee el combustible sobre la cantidad de energía aportada por la cámara de combustión al fluido), mientras que la pérdida de presión un 10%. A su vez según los cálculos del empuje y consumo específico, se espera que para una relación

de compresión de 2.6:1, el primero ronde los 296.2 N.s/kg y el segundo 61.61 mg/N.s. También es de esperar que la temperatura de los gases EGT ronde los 580 °C.

## **6. Conclusión**

Como análisis de todas las experiencias llevadas a cabo hasta la fecha podemos concluir:

1. Es factible la construcción de una cámara de combustión diseñada según el procedimiento de cálculo.
2. Es factible la construcción de un turborreactor de bajo costo con componentes automotrices.
3. Es posible es desarrollo interno de los sistemas de adquisición de datos como censor de alta frecuencia para el régimen de giro, sensores de temperaturas y presiones, etc.