

Cálculos térmicos y de dinámica de gases de un turbojet "power generation X-01", modificado con un rotor de ondas

Recibido: septiembre de 2011
Arbitrado: noviembre de 2011

Arnold Escobar Garzón*, Rafael Mauricio Cerpa Bernal**,
Janusz Piechna***, María Camila Rico Rodríguez****

Resumen

El artículo de investigación está enfocado en los cálculos térmicos y de dinámica de gases de un turborreactor, modificado con un rotor de onda. Esta serie de cálculos son el primer paso a seguir en el diseño y construcción de cualquier máquina térmica; además dan a conocer los comportamientos de los parámetros en cada una de las secciones del sistema de propulsión, como lo son la temperatura, presión, densidad, flujo másico de aire, empuje, consumo de combustible, entre otros.

El objetivo principal de este estudio es comprobar térmicamente que mediante la implementación de un rotor de ondas a un turborreactor, se logra una disminución en el consumo específico de combustible, y un incremento en la potencia desarrollada por el elemento.

Estos parámetros de diseño obtenidos en los cálculos térmicos y de dinámica de gases; serán utilizados en la siguiente fase del proyecto de investigación, que realizará simulaciones utilizando el software de dinámica de fluidos computacional CFD FLUENT, y de análisis de elementos finitos FEA "ANSYS 12".

Abstract

This paper is focused on a thermal and gas dynamics calculations, applied in a turbojet engine enhanced with a wave rotor. The aim of the analysis is to obtain the parameters in the turbojet engine sections, also check that

implementing a wave topping unit in a turbojet engine is possible to reduce the specific fuel consumption, and increase the thermal efficiency, specific thrust and thrust.

The parameters obtained in the thermal and gas dynamic analysis; will be used in the numerical analysis in a wave topping unit, using a computational fluid dynamic and Finite element analysis software's.

Palabras clave

Turborreactor, rotor de ondas, consumo específico de combustible, empuje, empuje específico, rendimiento térmico, rendimiento global.

* Candidato a Magister en Ingeniería mecánica con énfasis en Energías de la Universidad de los Andes. Ingeniero aeronáutico de la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá aesobar@usbbog.edu.co

** Magister en Ingeniería Aeroespacial con énfasis en Sistemas de Propulsión de la Universidad Politécnica de Varsovia y candidato a doctor en la misma. Ingeniero aeronáutico de la Universidad de San Buenaventura Bogotá roerpa@usbbog.edu.co

*** Ingeniero nuclear con Maestría (Msc) en Ingeniería Nuclear y Doctorado (Ph. D)(cooperation between reciprocating compressor and damping pressures pulsation pipe system) con más de 30 años en la industria aeronáutica, automotriz y nuclear y desde 1981 como docente del departamento de Tecnología de Aviación y Mecánica aplicada de la Universidad Politécnica de Varsovia. Email: jpie@meil.pw.edu.pl

**** Estudiante de Ingeniería Aeronáutica de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá. mrico@usbbog.edu.co.

INTRODUCCIÓN

Este artículo es el resultado del proyecto de investigación, avalado institucionalmente por la Universidad de San Buenaventura Sede Bogotá, titulado Construcción y Análisis Numérico Utilizando CFD FLUENT de la Operación de un Rotor de Ondas Aplicado a una Microturbina de Gas para Generación de Energía.

El avance industrial y tecnológico enfocado en los sistemas de poder y propulsión ha centrado sus estudios en la última década hacia la disminución de agentes contaminantes y el incremento de potencia, empuje

y velocidades de vuelo. Diversas investigaciones han propuesto el diseño, construcción e implementación de nuevos componentes, y modificaciones en el ciclo termodinámico empleado hasta el día de hoy por los turborreactores.

Un rotor de ondas es una nueva propuesta que desde sus inicios fue adoptada en el sector automotriz como turbo cargador. El propósito de este elemento es intercambiar energía de un fluido con mayor presión y temperatura hacia uno con menor¹; sus principales características son, la disminución del consumo específico de combustible, el incremento del empuje y la eficiencia térmica. En los rotores de onda el incremento de presión es obtenido por la generación de ondas de compresión que se generan dentro del rotor en ciertas apropiadas geometrías².

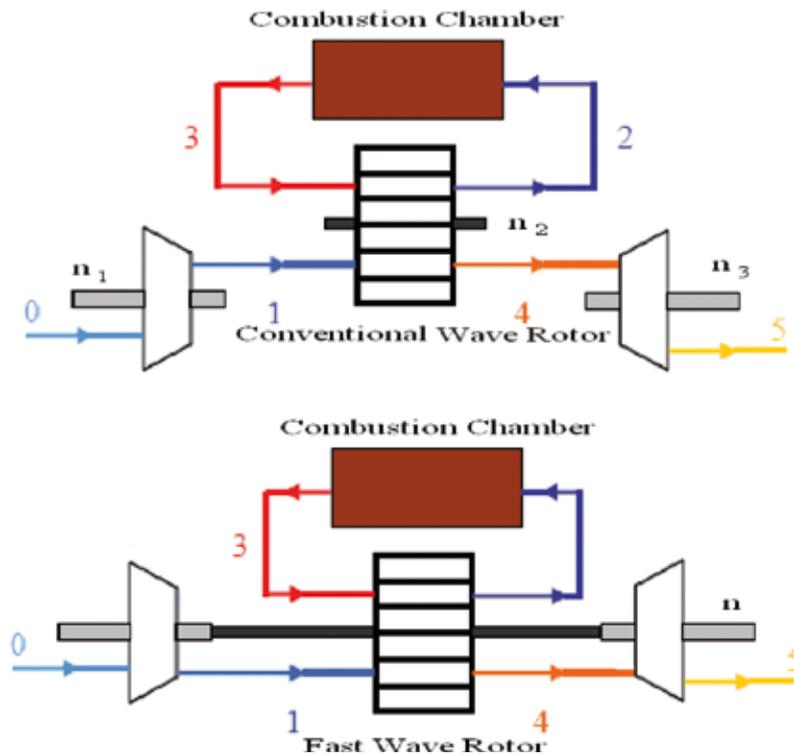


Figura 1. Esquema de un rotor de ondas aplicado a un turborreactor.

Un rotor de ondas es un componente que cuando se implementa en turborreactores, se localiza entre la turbina y el compresor y de forma paralela a la cámara de combustión (ver figura 1); el rotor de ondas puede llegar a tener la misma velocidad rotacional del componente turbina-compresor, o puede

rotar a diferente velocidad que el anterior componente si se adiciona un motor eléctrico o una turbina libre.

En un rotor de ondas, los gases calientes que provienen de la cámara de combustión, comprimen el aire que viene desde el compresor, esto significa que el rotor de ondas utiliza un fluido con elevada presión, para transmitir ener-

gía directamente a un fluido con baja presión. Luego de que al aire proveniente del compresor se le aumenta la presión y temperatura, este es inyectado a la cámara de combustión, y el gas proveniente de la misma es enviado hacia la turbina.

I. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

A. Cálculos térmicos y de dinámica de gases turborreactor base

Los cálculos térmicos y de dinámica de gases, se realizaron en condiciones estáticas, motivo por el cual el mach de vuelo y la velocidad de vuelo son iguales a cero.

El turborreactor base, es un motor diseñado y construido, a partir de un turbo cargador, motivo por el cual la relación de compresión, flujo másico, presiones y temperaturas, difieren en las características de estos mismos parámetros en turborreactores aplicados en los Aero reactores.

Los siguientes son los datos de entrada del motor base sin la implementación del rotor de ondas.

PARÁMETROS	VALOR	UNIDAD
Temperatura Ambiente (Bogotá - Colombia)	289,45	K
Presión Ambiente (Bogotá - Colombia)	75190,07	Pa
Temperatura de Entrada de Turbina	1073,15	K
Relación de Compresión (Compresor)	3,25	-
Flujo Másico de Aire	0,128	kg/s

Tabla 1. Datos de Entrada del turborreactor

Para poder obtener las características de operación de un motor turborreactor con un rotor de ondas implementado; es necesario, conocer los parámetros de operación del motor base. (Ver figura 2).

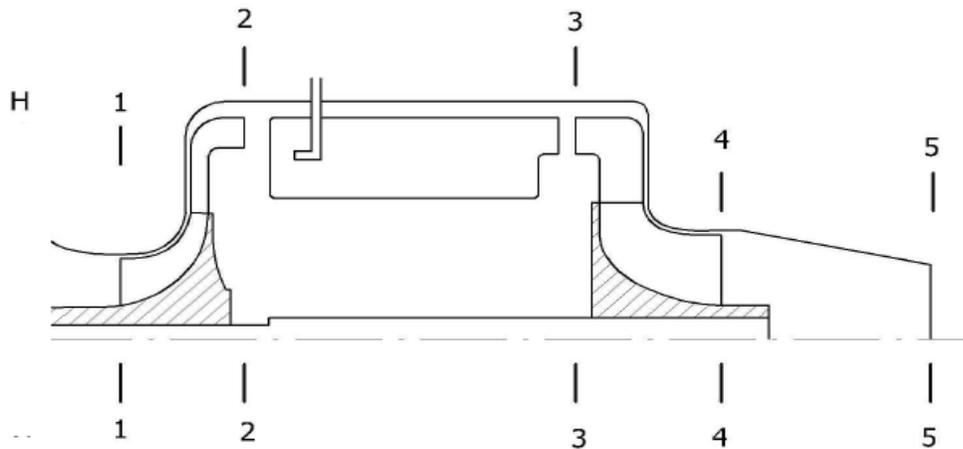


Figura 2. Diagrama de las estaciones del motor3

En la figura 2 se muestra un diagrama de las estaciones del motor turborreactor base; las siguientes son las estaciones indicadas en esta figura:

1. Entrada del compresor.
2. Entrada de la cámara de combustión.
3. Entrada de la Turbina

4. Salida de la Turbina
5. Salida de la tobera

Estudios realizados por el grupo de investigación Green Energy GIMOC, dieron como resultado los siguientes datos:

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura de entrada del compresor	289,45	K
Presión de entrada del Compresor	74438,1693	Pa
Trabajo del Compresor	153181,0261	J/Kg
Presión de Salida del compresor	241924,0502	Pa
Temperatura de Salida del compresor	441,9447995	K
Presión de entrada de Turbina	232247,0882	Pa
Trabajo de la turbina	152210,6272	KJ/Kg
Temperatura de salida de Turbina	942,469908	T
Grado de expansión de la turbina	2,110098258	
Presión de salida de la turbina	110064,5846	Pa
Expansión Tobera de Salida	0,683144994	
Velocidad de gases de salida	440,5714258	m/s
Presión de salida	75190,07	Pa
Temperatura de Salida	859,1464829	K
Densidad de Salida	0,302827583	Kg/m ³
Flujo másico	0,595394565	kg/s
Empuje Específico	447,8588196	N/kg.s
Empuje	266,652707	N
Consumo específico de combustible	0,132958859	kg/N.h

Tabla 2. Resultados del análisis térmico y de dinámica de gases motor base.

B. Cálculos térmicos y de dinámica de gases turboreactor implementado con rotor de ondas

La ventaja general de la implementación de un rotor de ondas a un turboreactor, según estudios térmicos; radica en que las ondas de choque de compresión producen un incremento de presión y temperatura del aire que entra a la cámara de combustión; de esta forma se reduce el consumo específico de combustible debido al incremento de temperatura del aire; y la turbina posee

mayor entalpia para ser aprovechada y convertida en trabajo útil.

En un ciclo Brayton real aplicado a turboreactores la presión de entrada de la turbina es siempre menor que la presión de salida del compresor; debido a las pérdidas hidráulicas y de fricción en la cámara de combustión; con la implementación de un rotor de ondas es posible observar que la presión de entrada de la turbina siempre será mayor que la presión de salida del compresor, debido a la relación de compresión entregada por el rotor de ondas.

Para el análisis térmico del turboreactor implementado con rotor de ondas se utilizaron los siguientes datos de entrada:

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
temperatura Ambiente	289,45	K
Presión Ambiente	75190,07	Pa
Temperatura a la salida de la cámara de combustión	1120,15	K
Temperatura a la entrada de la turbina	1073,15	K
Relación de Compresión (Compresor)	3,25	
Flujo másico de aire	0,4608	kg/s
Relación de Compresión (rotor de ondas)	1,45	

Tabla 3. Datos de Entrada del turboreactor implementado con rotor de ondas.

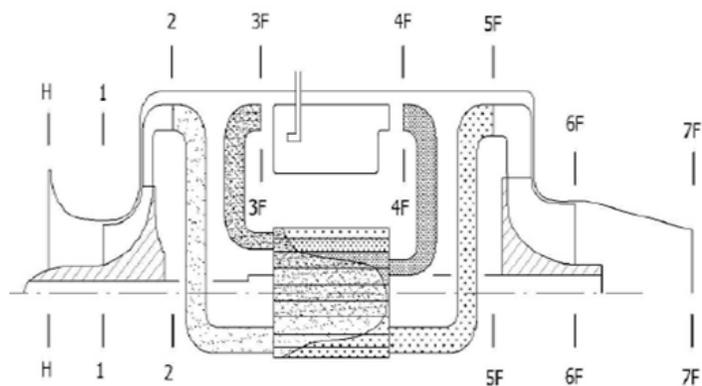


Figura 3. Diagrama de las estaciones del motor³

En la figura 3 se puede observar el turboreactor base; implementado con un rotor de ondas; como se comentó anteriormente este componente está localizado entre el

compresor y la turbina; además está de forma paralela a la cámara de combustión. Es posible observar que el rotor de ondas tiene cuatro puertos; posee una entrada de aire proveniente desde el compresor; una salida de aire y entrada de gases hacia y desde la cámara de combustión; y finalmente una salida de gases hacia la turbina.

En la figura 3 se muestra un diagrama de las estaciones del motor turborreactor implementado con un rotor de ondas; las siguientes son las estaciones indicadas en esta figura:

H. Parámetros atmosféricos

1. Entrada del compresor.
2. Entrada rotor de ondas.

3F.Entrada de la cámara de combustión

4F.Salida Cámara de Combustión

5F.Entrada de Turbina

6F.Salida Turbina

7F.Salida Tobera

Siguiendo la metodología de cálculo, análisis térmico y de dinámica de gases planteada en la investigación titulada "Design of Micro Turbojet Engine Intended to be supercharged by wave rotor ³". Se encontraron los siguientes parámetros de operación del rotor de ondas:

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura de entrada del compresor	289,45	K
Presión de entrada del compresor	74438,1693	Pa
Trabajo del Compresor	153181,026	J/Kg
Presión de Salida del Compresor	241924,05	Pa
Temperatura de salida del compresor	441,9448	K
temperatura de entrada Cámara de combustión	503,817575	K
Presión de entrada Cámara de combustión	350789,873	Pa
Presión de salida Cámara de Combustión	336758,278	
Trabajo de la turbina	152236,006	KJ/Kg
Temperatura de salida de la turbina	942,448119	K
Presión de salida de la turbina	118911,18	
Grado de expansión de la tobera	0,61967486	
Velocidad de Salida	490,805599	m/s
Presión de Salida	75190,07	Pa
Temperatura de Salida	839,040276	K
Flujo Másico	0,59539456	kg/s
Empuje específico	498,84073	N/kg.s
Empuje	297,00706	N
Consumo Específico de combustible	0,11814737	kg/N.h

Tabla 4. Resultados del análisis térmico y de dinámica de gases motor implementado con rotor de ondas.

De acuerdo a las estaciones del motor citadas en la figura número tres se obtuvieron los siguientes diagramas Presión – Volumen; Temperatura - Entropía.

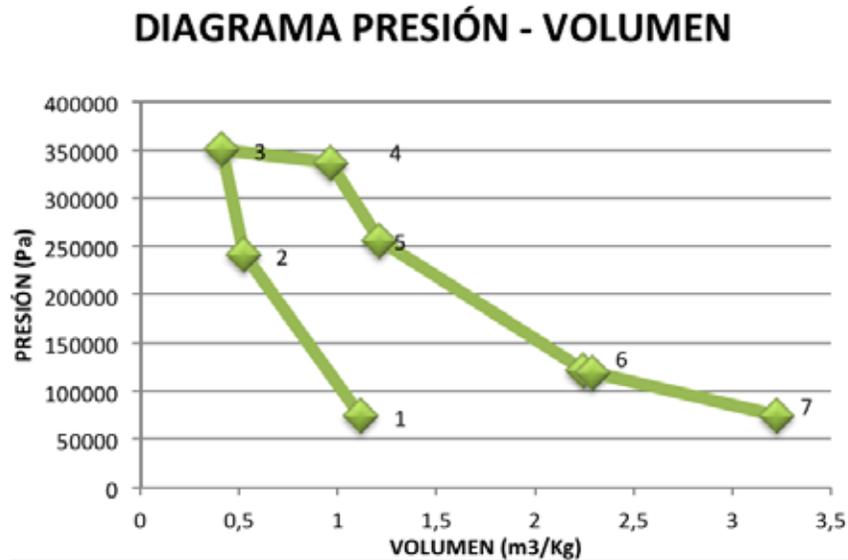


Figura 4. Diagrama Presión – Volumen

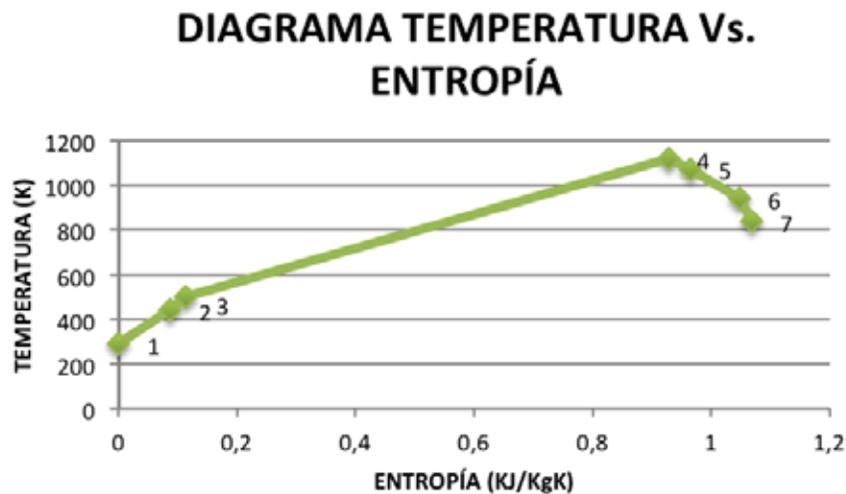


Figura 5. Diagrama Temperatura – Entropía

En el diagrama presión – volumen (Figura 4) y Temperatura – Entropía (T-S), se obtuvieron los resultados típicos del comportamiento de los parámetros, según lo indicado teóricamente en el ciclo Brayton; de 1 a 2 se observa el incremento de presión y temperatura logrado en el compresor; este depende de la relación de compresión desarrollada por compresor; de 2 a 3 se continúa incrementando la presión y la temperatura, pero ahora en el rotor de

ondas; de 3 a 4 existe una adición de calor en la cámara de combustión; en un ciclo Brayton ideal esta adición a calor es a presión constante; pero como en los cálculos térmicos se tuvieron en cuenta rendimientos y pérdidas; se puede ver de 3 a 4 la caída de presión dentro de la cámara de combustión, de 4 a 5 existe una expansión de los gases dentro del rotor de ondas; generando una reducción en la presión y temperatura, de 5 a 6 el gas se continúa expandiendo pero ahora en la turbina y de 6 a 7 se expanden los gases en la tobera para obtener de esta forma, el máximo empuje posible.

C. Comparación resultados turborreactor base E implementado con rotor de ondas

Teniendo los resultados de los cálculos térmicos y de dinámica de gases del turborreactor base y el mismo modificado con rotor de ondas; se realizó una comparación que diera como resultado la comprobación de la teoría, que propone que un rotor de ondas implementado a un

motor a reacción, genera un incremento en el empuje, en el empuje específico y una disminución en el consumo específico de combustible.

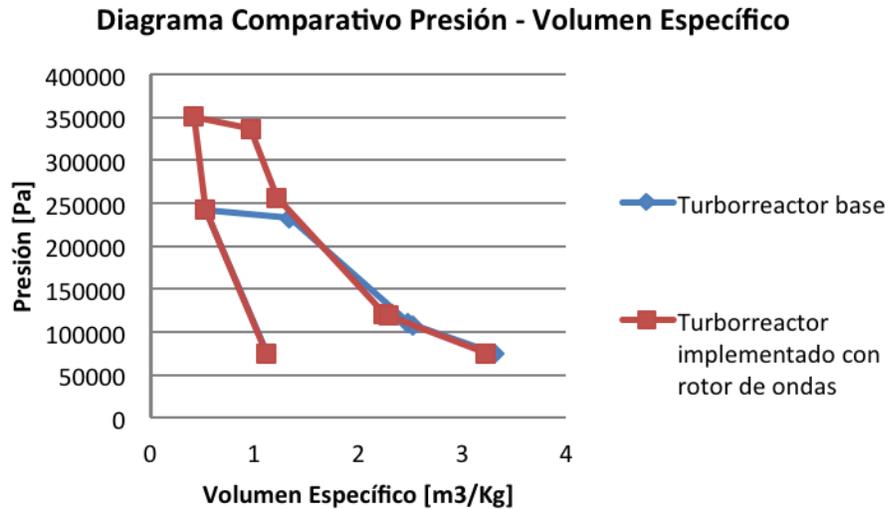


Figura 6. Comparación de ciclos Diagrama Presión – Volumen

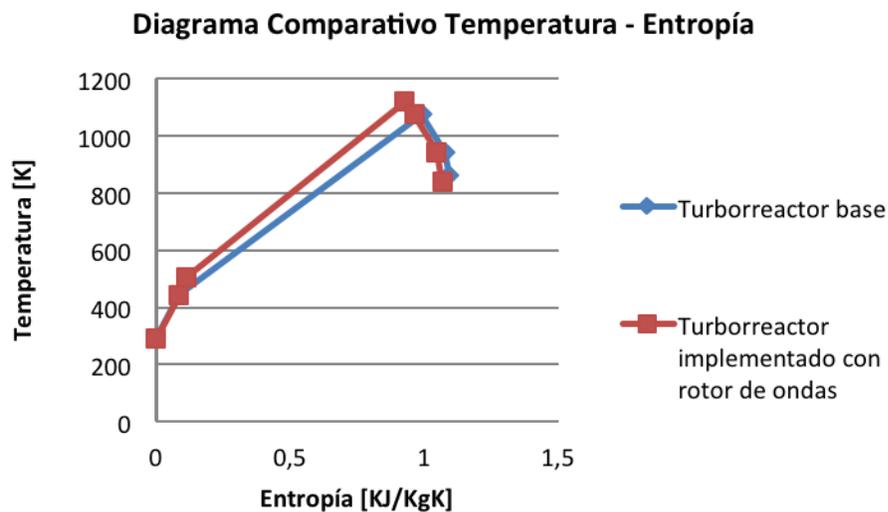


Figura 7. Comparación de ciclos Diagrama Temperatura – Entropía

En la figura 6 y 7 se observa la comparación entre el turbo reactor base y el modificado con rotor de ondas; se puede concluir que la presión y temperatura máximas en el ciclo, se alcanzan dentro del rotor de ondas; esto quiere decir que la presión de entrada de la cámara de combustión es mayor que en el turbo reactor base y por consiguiente su temperatura también, generando que la energía calorífica para alcanzar la temperatura de entrada de turbina que es constante; sea mucho menor, motivo por el cual no se deberá inyectar la misma cantidad de combustible en comparación con el turbo reactor base; produciendo una disminución en el consumo específico de combustible.

El aumento de potencia se ve reflejado en el área de trabajo obtenida en cada uno de los diagramas; es notable que un turbo reactor implementado con rotor de ondas; tiene mayor energía para producir trabajo (entalpía); o sea que su área es mucho mayor a la del turbo reactor base. Esta energía es brindada por la elevada presión y temperatura desarrolladas por las ondas de choque de compresión que se generan dentro del rotor de ondas. El rendimiento térmico también aumenta si se ensambla un rotor de ondas en un turbo reactor; esto puede ser observado en la figura 7; donde se ve claramente que la entropía (cantidad de trabajo que no puede utilizarse para producir trabajo) que se genera en un turbo reactor con rotor de ondas es menor que la misma producida en un turbo reactor base.

Diagrama comparativo de Resultados

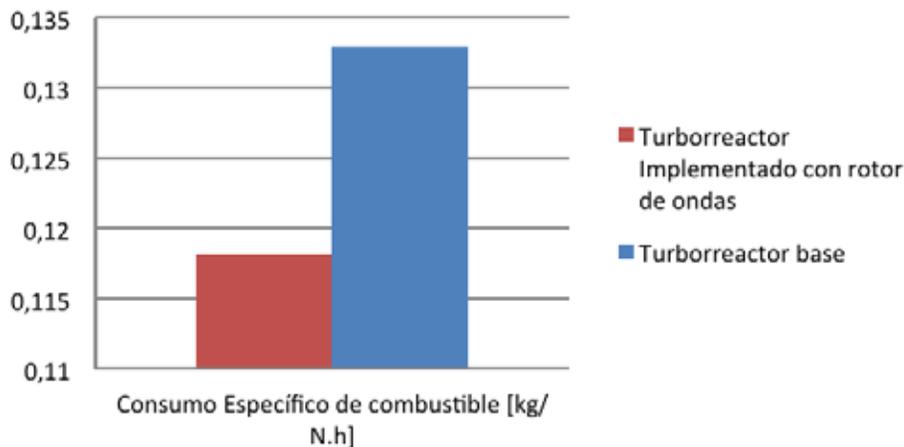


Figura 8. Diagrama Comparativo Consumo Especifico de combustible

Un turbo reactor simple con las condiciones iniciales propuestas en la tabla 1, tiene un consumo específico de combustible según la metodología de análisis térmico y de dinámica de gases, de $0,132958859 \frac{\text{Kg}}{\text{Nh}}$; y un turbo reactor implementado con rotor de ondas consume $0,11814737 \frac{\text{Kg}}{\text{Nh}}$. Comprobando de esta manera que la utilización de rotores de onda disminuye la cantidad de

combustible quemado para producir una unidad de empuje. Además cabe aclarar, que si se disminuye el consumo específico de combustible; se reducen los costos de operación y la emisión del CO_2 ; que es uno de los contaminantes que más aporta al incremento del efecto invernadero,

Diagrama comparativo de Resultados

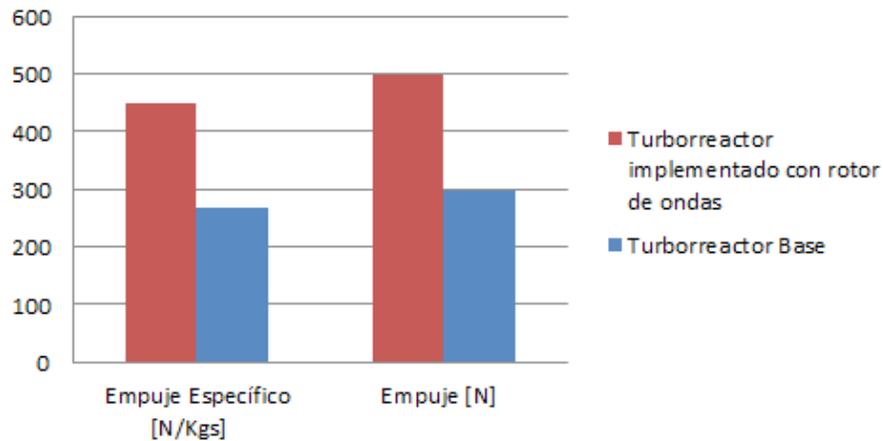


Figura 9. Diagrama Comparativo Empuje Especifico y Empuje

Un turborreactor simple con las condiciones iniciales propuestas en la tabla 1, tiene un empuje específico y un empuje según la metodología de análisis térmico y de dinámica de gases, de $447,8588196 \frac{N}{Kg.s}$ y $266,652707 N$, y un turborreactor implementado con rotor de ondas produce $498,84073 \frac{N}{Kg.s}$ y $297,00706 N$. De esta forma

queda totalmente comprobado que el incremento de temperatura y presión máxima de operación, dan como resultado un aumento en el empuje específico y empuje o potencia generada por el motor a reacción.

Resultados Implementación Rotor de Ondas en un Turborreactor

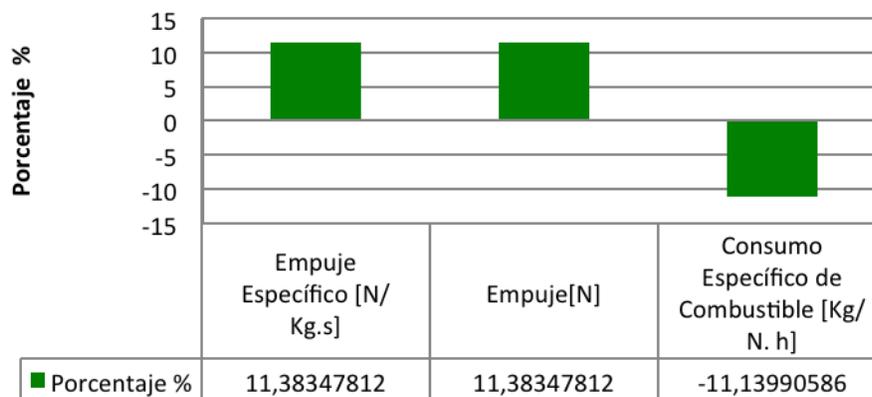


Figura 10. Resultados Implementación Rotor de Ondas en un Turborreactor

Finalmente se realizó un análisis de datos obtenidos; que dio como resultado, que con la implementación de un rotor de ondas a un turborreactor, el empuje específico y empuje aumentan alrededor del 11,38 % y el consumo

específico de combustible disminuye un 11,1299%. Comprobando de esta forma la teoría planteada por los científicos y autores creadores de esta propuesta.

CONCLUSIONES

La implementación de un rotor de ondas a un turborreactor, o a cualquier sistema de propulsión, genera un incremento en la potencia específica y en la potencia desarrollada por la turbo maquinaria y una disminución en el consumo específico de combustible, según los cálculos térmicos y de dinámica de gases.

La implementación de un rotor de ondas a un turborreactor, conllevaría a estudios más avanzados de fluido inestable, materiales de fabricación, construcción y análisis estructural, dado a las temperaturas y presiones generadas por la onda de choque de compresión y expansión causada por los gases calientes que entran al rotor de ondas.

Se puede lograr una reducción en la producción de agentes contaminantes, incorporando a los sistemas de propulsión; componentes tales como el rotor de ondas, que consumen menor cantidad de combustible y por consiguiente producen menos dióxido de carbono.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Piechna J., "Wave Machines Models and Numerical Simulation", Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warsaw. 2005
- [2] Akbari P., Müller N., Gas Dynamic Design Analyses of Charging Zone for Reverse Flow Pressure Wave Superchargers. ICES 2003-69
- [3] Piechna J., Staniszewski M., Design of Micro – Turbojet Engine Intended to be supercharged by wave rotor, Politechnika Warszawska, Warsaw
- [4] Cerpa R, Piechna J, Muller N "Numerical Analysis of the untypical Effects in a wave topping unit for a small turbojet, Revista de la facultad de Ingeniería N° 20. 2009. P5-14.
- [5] Piechna J, Escobar A., Müller N.; „Project of a Small Turbo Jet Engine Topped by the Wave Machine", The 3rd International Symposium on Innovative Aerial/Space Flyer Systems (Nov. 24-25, 2006, The University of Tokyo); ; PL-12, pp.81-88. 2006
- [6] Cerpa R., "Numerical Analysis of Speed Pressure Wave Exchanger Operation", Master Thesis, Warsaw University of Technology, 2009.
- [7] Resultados proyecto de investigación Construcción y Análisis Numérico Utilizando CFD FLUENT de la Operación de un Rotor de Ondas Aplicado a una Microturbina de Gas para Generación de Energía. Universidad de San Buenaventura sede Bogotá.
- [8] Akbari P., Nalim R., Müller N., A Review of Wave Rotor Technology and its Applications, MECE2004-60082.
- [9] Akbari P., Müller N., Performance of small gas turbines through use of wave rotor topping cycles, GT2003-38772
- [10] Akbari P., Nalim R., Müller N., A review of wave rotor technology and its applications.
- [11] Hongde J., "Two-Dimensional Unsteady Flow in Complex Rotor", Tokyo International Gas Turbine Congress, Paper 83-Tokyo-IGTC-59, pp. 463-470. 1983.
- [12] Hongde J., 1984, "Two-Dimensional Unsteady Flow in Complex Rotor", Scientia Sinica (Series A), Vol. XXVII No 8, pp. 847-858.
- [13] Larosiliere L.M., and Mawid M., "Analysis of Unsteady Wave Processes in a Rotating Channel", AIAA Paper 93-2527, July. 1993
- [14] Larosiliere L.M., and Mawid M., "Analysis of Unsteady Wave Processes in a Rotating Channel", International Journal of Numerical Methods in Fluids, 21, pp. 467-488. 1995.
- [15] Paxson D., and Lindau J., , Numerical Assessment of Four Port Through Flow Wave Rotor Cycles with Passages Height Variation, 33rd joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 97-3142. 1997.