

Diseño y construcción de una turbina libre para generación de energía*

Design and building of a free turbine for power generation

Fechas de recepción: 28 de Septiembre de 2015
Fecha de aprobación: 25 de Noviembre de 2015

Por: Jhoan Alexander Barrios Zárate**
Miguel Angel Bernal Maldonado***

Resumen

El siguiente artículo presenta el proceso detallado para el diseño y construcción del primer prototipo de turbina libre para la generación de energía construido en el país, con el fin de contribuir en el desarrollo de este tipo de tecnologías alternativas. Se presenta el fundamento teórico con cada uno de los principios que dan base al diseño conceptual y matemático de la turbina libre; seguido de la modelación Computer Asisted Design (CAD) para cada uno de los componentes que la conforman, así como el análisis computacional básico de esfuerzos y cargas para las partes más críticas de la turbina. También se presenta todo el proceso de fabricación del prototipo, y se mencionan paso a paso los procedimientos de manufactura y ensamble que se deben seguir para la elaboración de cada parte de la turbina libre, además de los acabados exteriores y accesorios que la conforman. El enfoque final de este proyecto es brindar una base para el desarrollo de turbinas libres en el país y para el país, y beneficiar así a la sociedad y a las poblaciones que no cuentan con un adecuado servicio de energía eléctrica.

Palabras clave: central de ciclo combinado, dimensionamiento, energía residual, fabricación, generador eléctrico, turbina libre.

Abstract

The following article presents the detailed process for the design and construction of the first free turbine power generation prototype built in the country. This is done in order to contribute to the development of this kind of alternative technologies. The theoretical foundation with which each of the principles gave the basis for the conceptual and mathematical design of the free turbine is presented. Computer Asisted Design (CAD) modeling followed for each of the components that made part of it, as well as a basic computational stress and load analysis for the most critical parts of the turbine. The whole manufacture process for the prototype as well as a step by step manufacturing and assembly procedure followed for the preparation of each part of the free turbine, is also shown as well as the exterior finishes and accessories that make part of the prototype. The final focus of this project is to provide a basis for the development of free turbines in and for the country, and thus benefit places that do not have adequate electrical service.

Keywords: Combined cycle power plant, electric generator, free turbine, manufacture, residual energy, sizing.

* Artículo de investigación científica y tecnológica.

** Ingeniero aeronáutico. Fundación universitaria Los Libertadores. Centro de investigaciones Couch Aviation. jhoabz@gmail.com

*** Ingeniero aeronáutico. Fundación universitaria Los Libertadores. Centro de investigaciones Couch Aviation. miguel.bernal@hotmail.com

Introducción

En la actualidad el aprovechamiento de cualquier tipo de energía en beneficio de la sociedad es uno de los principales temas de investigación y desarrollo en el mundo, lo que representa una oportunidad para el país y para su industria aeronáutica de vincularse con este tipo de investigaciones científicas y tecnológicas.

En el ámbito aeronáutico, un motor a reacción es una máquina generadora de dos tipos de energía, una mecánica (empuje) y otra térmica (gases de escape) que no se aprovecha y se disipa en el ambiente en forma de calor. De acuerdo con lo expuesto anteriormente, surge la siguiente problemática: ¿de qué manera se pueden aprovechar los gases de escape que se expulsan a la salida de la tobera de un motor a reacción para la generación de energía?

Para dar una solución a la problemática planteada anteriormente, se propone el diseño y construcción de una turbina libre como mecanismo para aprovechar la energía térmica generada por el motor a reacción RGG1 construido en la Fundación Universitaria Los Libertadores, y a partir de esta crear una fuente generadora de energía aprovechable y consumible para el beneficio de las poblaciones que no cuentan con un adecuado servicio de energía eléctrica; siendo este la segunda fase de la Central de Ciclo Combinado de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

Aunque a nivel global empresas como Siemens están desarrollando turbinas de gas que generan grandes cantidades de energía para abastecer las plataformas petroleras del lecho marino, no existe tal tecnología desarrollada a nivel nacional, por lo que se hace necesario acudir a este tipo de empresas para adquirir estas tecnologías, lo que genera mayores costes económicos y dependencia extraterritorial. Por esto, con este proyecto se busca generar un impacto tecnológico en el país e incentivar la investigación y el desarrollo de este tipo de avances tan necesarios para nuestra población.

En este artículo se presenta el diseño y la construcción de un prototipo no funcional de turbina libre, el cual tiene como principal objetivo brindar las bases y fundamentos para construir la primera central de ciclo combinado en el país. Este prototipo consta básicamente de un disco rotor y un eje, de allí surge el concepto de *libre*, porque es un mecanismo que aprovecha la energía de un fluido para generar su propio movimiento; además, utiliza otros elementos como una etapa de estator para direccionar y acelerar el flujo en el sentido deseado y un acople especial a un generador que finalmente es el encargado de transformar la energía mecánica del movimiento en la energía eléctrica deseada.

Para diseñar y construir el prototipo de turbina libre es necesario desarrollar los cálculos pertinentes (termogasdinámicos, dimensionales, selección de álabes), realizar un diseño asistido por computador de

cada uno de los componentes de la turbina y un análisis computacional básico de esfuerzos y cargas a los componentes más críticos de la turbina libre y así construir un prototipo maqueta no funcional que sirva como base para la implementación de la turbina libre funcional.

Metodología

Tipo de investigación

El tipo de estudio utilizado en la presente investigación es descriptivo, ya que se quiere determinar las características físicas, operativas y de funcionamiento de un dispositivo para el aprovechamiento de energía, y a partir de esto diseñar y construir un prototipo de turbina libre. El proyecto se basa en un método de observación cuantitativa. El diseño y la construcción de la turbina libre generadora de energía consiste en dos fases:

Fase de diseño de la turbina libre

Se inicia con la elaboración de los cálculos de diseño preliminares de la turbina libre, tomando como base las variables de temperatura, presión y velocidad de salida de gases del motor a reacción destinado para trabajar. Esta fase incluye todos los cálculos de dimensionamiento, cálculos termogasdinámicos y cálculos operacionales para el funcionamiento del mecanismo, además de la realización de un modelo de la turbina libre en un sistema CAD.

Fase de construcción de la turbina libre

Para la construcción del prototipo se realizaron diferentes procesos de maquinado y manufactura, como el torneado y corte a láser de piezas de alta precisión. Por último, y posterior al ensamble, se dan a conocer todas las recomendaciones para hacer funcional el prototipo construido y su modo de implementación en la Central de Ciclo Combinado.

Marco teórico

Turbinas

Comúnmente llamadas turbomáquinas, las turbinas son usadas para transformar parte de la energía global de un fluido (suma de las energías de presión, cinética e interna debida a la temperatura) en energía mecánica. "En un turborreactor esta energía mecánica será la que mueva el compresor y los accesorios, y el remanente de esta energía será la que genere el empuje en el motor" (Mattingly, 2006, p. 852). Un escalón de turbina está formado por dos componentes fundamentales: el estator y el rotor (figura 1). El salto de presión por escalón es aproximadamente el mismo en las turbinas de tipo axial y centrífuga.

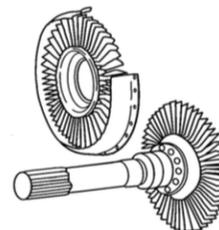


Figura 1. Componentes de una turbina de flujo axial.
Fuente: Mattingly (2006, p. 249).

El estator de una turbina, ya sea axial o centrípeta, actúa a modo de tobera; en el caso del estator de una turbina centrípeta su configuración es similar al compresor centrífugo, mientras que en la turbina axial los estatores se encuentran fijos al case del motor con un ángulo tal, que canalizan el fluido hacia el rotor, de manera que la dirección sea la más efectiva posible para la transformación de energía cinética en mecánica. Por otro lado, el rotor de una turbina axial consiste en una o varias cascadas de álabes fijos a un disco que gira a alta velocidad por la acción del fluido, y se transmite este movimiento al compresor, a un generador eléctrico o a lo que se desee mover o accionar con la turbina.

Las turbinas axiales suelen tener mayor uso en el campo aeronáutico de propulsión a reacción, debido al alto flujo que pueden trabajar. Estas turbinas axiales se pueden clasificar en dos tipos:

- Turbinas de impulso y de reacción. Estas se diferencian básicamente en su grado de reacción, el cual se entiende como la variación entre la energía del rotor, respecto a la variación de energía del conjunto estator-rotor, que físicamente se representa como la relación existente producida entre la expansión del rotor respecto a la expansión del conjunto estator-rotor. El trabajo proporcionado por una turbina axial es mayor en cuanto lo sea la turbina, además de la velocidad del rotor y la deflexión de la corriente.

“El trabajo específico que puede obtenerse con un escalón de turbina axial, conjunto estator-rotor, es del orden de 10.000 a 20.000Kg.m, por cada kg de fluido que la mueve” (Sáinz, 2007, p. 241), lo cual es mayor que el necesario para mover un escalón de compresor; es por esa razón que el número de escalones de la turbina es menor que los del compresor. Las turbinas radiales y axiales han sido ampliamente usadas en muchas aplicaciones, entre las que se encuentran pequeños generadores de poder eléctrico, motores turbo cargados y unidades auxiliares de poder en la aeronave.

En cada una de estas aplicaciones la temperatura interna de la turbina se encuentra limitada por las propiedades físicas y químicas de los materiales y de las partes calientes dentro de los rotores, por eso es necesario contar en algunos casos con un sistema de enfriamiento de álabes o recubrimientos cerámicos para poder soportar estas temperaturas tan elevadas que se presentan en la operación de la turbina y evitar así daños en los componentes de esta.

Diseño de la turbina libre

Cálculos termogasodinámicos de la turbina libre

“Los cálculos termogasodinámicos se realizan con el objetivo de explicar el comportamiento del fluido” (Cengel y Boles, 2009, p 993) dentro de la turbina libre.

Para realizar dichos cálculos se toman los parámetros a la salida del motor RGG1 que se representan en la tabla 1.

PARÁMETROS DE ENTRADA A LA TURBINA		
Flujo másico (m)	1,5	kg/s
Temperatura a la entrada (T_1)	835,83	K
Salto de temperatura (ΔT)	148	K
Calor específico a presión Constate del gas (C_p)	1148	$\frac{J}{Kg K}$
Relación de calores Específicos (γ)	1,33	
Constante especifica del gas R	287	$\frac{J}{Kg K}$
Presión a la entrada de la turbina (P_1)	187202,4	Pa
Numero mach de entrada (M_1)	0,43	

Tabla 1. Condiciones de entrada a la turbina libre
Fuente: González Olarte, Gutiérrez Novoa y Quintero Rodríguez (2014).

Con base en el procedimiento para cálculos de turbinas del libro *Gas turbine theory* (Saravanamutto, 1983, p. 435), se calculó el grado de reacción para la turbina libre, y se obtuvo como resultado un valor $k = 0,005$. Esto indica que se está trabajando con una turbina de impulso. Así mismo, se determinó el triángulo de velocidades en cada sección de la etapa de turbina libre (figura 2); las componentes de velocidad indican que la velocidad máxima se alcanza en la sección 2, debido a que en el espacio que se encuentra entre disco estator-rotor se alcanza la mayor temperatura de operación de toda la turbina libre. Este valor calculado teóricamente es alrededor de 1005 K.

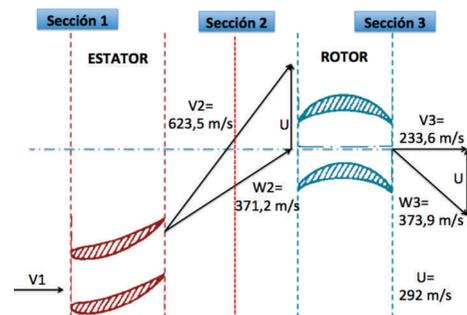


Figura 2. Triángulos de velocidades por secciones de la turbina libre Fuente: elaboración propia.

Donde:

- V1: Velocidad absoluta de entrada del fluido al estator.
- W2: Velocidad relativa del fluido a la salida de los álabes del estator.
- V2: Velocidad absoluta de salida del fluido de los álabes del estator.
- U: Velocidad media del rotor.
- W3: Velocidad relativa del fluido a la salida de los álabes del rotor.
- V3: Velocidad absoluta de salida del fluido de los álabes del rotor.

En las figuras 3 y 4 se puede observar el comportamiento de la presión y la velocidad en las secciones 1, 2 y 3 de la etapa de turbina, las cuales se comparan con las gráficas propuestas en el libro *Motores a reacción. Tecnología y operación de vuelo* (Cuesta, 1980, p. 552), y se obtuvo gran similitud para turbinas de impulso y como resultado una disminución en la presión a través de cada una de las secciones de la etapa de turbina. En contraste, el comportamiento de la velocidad suele tener un comportamiento parabólico, por lo tanto es mayor a la salida de la etapa en comparación con la velocidad de entrada del fluido en la turbina libre, indicando que se está aprovechando parte de la energía que contiene los gases de escape del motor RGG1.

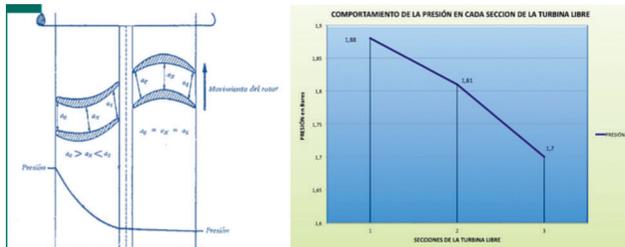


Figura 3. Comportamiento de la presión en cada sección de la turbina libre
Fuente: elaboración propia.

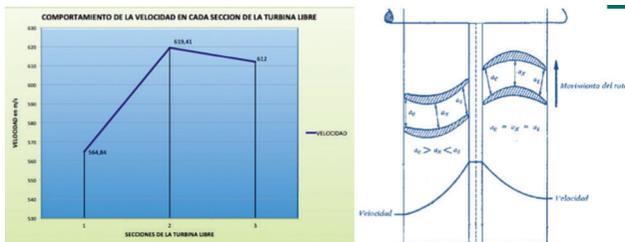


Figura 4. Comportamiento de la velocidad en cada sección de la turbina libre
Fuente: elaboración propia.

Cálculos geométricos de la turbina libre

Con base en los cálculos obtenidos anteriormente, se pueden determinar por medio de las presiones y las temperaturas halladas las densidades y áreas para cada una de las secciones de la turbina libre. Para esto se tuvo en cuenta la expansión térmica para el acero inoxidable, con el fin de "evitar que el rotor a altas

temperaturas roce con las paredes internas de la carcasa de turbina" (Escobar Garzón, 2008, p. 136). De esta forma se calcularon los diámetros externos e internos para el estator y rotor de la turbina libre (el resultado de las dimensiones se puede observar en la figura 5), lo que generó, como era de esperarse, dimensiones muy pequeñas en las que las tolerancias entre componentes estaban entre 1 mm y 5 mm. Estas últimas pueden ser críticas en caso de realizar pruebas funcionales.

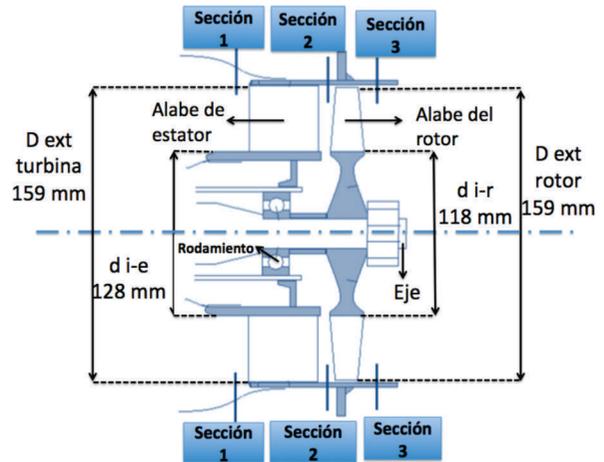


Figura 5. Dimensiones de la turbina libre
Fuente: elaboración propia.

Selección de los álabes de turbina libre

Para la turbina libre se ha establecido un perfil aerodinámico de nomenclatura RAF 27, recomendado para turbinas axiales (Saravanamutto, 1983, p. 294). En la figura 6 se puede observar el perfil y sus coordenadas para modelarlo; este perfil es simétrico respecto a su eje medio, así su centro de presión no varía y presenta una relación de espesor/cuerda (t/c) de 0.1, lo que favorece la construcción de estos componentes con láminas de acero inoxidable, para el caso de prototipo de turbina libre.

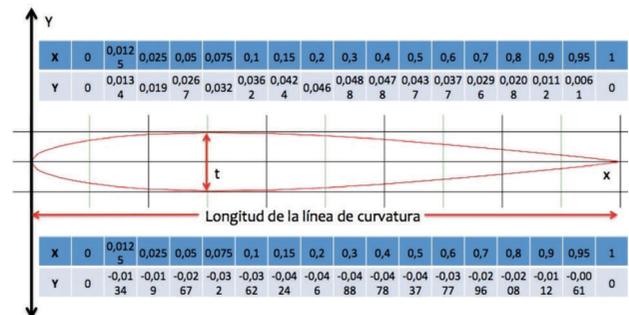


Figura 6. Perfil de álabes RAF 27 y sus coordenadas
Fuente: elaboración propia.

Se estableció una línea de diseño con base en el motor FD3/64 y una turbina de bajo flujo másico (Escobar Garzon, 2008, p. 142), con el fin de obtener las

principales dimensiones para los álabes de estator y rotor en cuanto a cuerda, altura, espesor y sus correspondientes relaciones (tabla 2).

TURBINA	h (mm)	c (mm)	s (mm)	t (mm)	h/c	s/c	t/c
Estator	20	20	15	2	0,8	0,75	0,1
Rotor	20	15	9	2	1,33	0,6	0,1

Tabla 2. Dimensiones y relaciones para los álabes de la turbina libre
Fuente: elaboración propia.

Donde: h: Altura álabes.
c: Cuerda álabes.
s: Paso álabes.
t: Espesor álabes.

Cálculos finales de la turbina libre

Finalmente se obtuvieron los principales cálculos de operación de la turbina libre, como lo es una potencia de 250,6 kW (336 HP) y un torque de 39,8 Nm, lo cual indica teóricamente que este dispositivo al tener bajo torque no impulsará un generador de gran tamaño, pero gracias a su potencia mantendrá eficientemente el movimiento de rotación del dispositivo, lo cual genera un flujo de energía constante. Es necesario aclarar que los valores obtenidos son de carácter teórico, debido a que la turbina libre es un prototipo no funcional.

Construcción de la turbina libre

El proceso de construcción del prototipo de la turbina libre se realizó en diferentes etapas, partiendo de la modelación de los componentes, el análisis estructural computacional de las partes más críticas, con la finalidad de hacer una correcta selección de los materiales por utilizar y por último la fabricación de cada uno de los componentes que la conforman.

Modelamiento de las piezas de la turbina libre

Para iniciar el proceso de construcción del prototipo se realizó un diseño asistido por computador CAD (figura 7) de cada una de las piezas por fabricar, con el fin de realizar el análisis estructural computacional y el corte a láser de algunas piezas, y obtener todos los planos de trabajo, que son "la herramienta primaria de trabajo para el técnico e ingeniero al momento de empezar a fabricar" (Mott, 2006, p. 3).



Figura 7. Modelamiento de la turbina libre
Fuente: elaboración propia.

Análisis estructural computacional

Para continuar con el proceso de construcción del prototipo es necesario realizar una serie de análisis estructurales computacionales, para poder determinar las diferentes cargas y esfuerzos que deben soportar las piezas más críticas de la turbina libre. En este caso se realizó un análisis por elementos finitos Finite Elements Analysis (FEA), con la ayuda del software ANSYS.

Los álabes de rotor y los anillos retenedores se consideran como las piezas más críticas de la turbina libre; por tal razón, se sometieron a un análisis FEA estático lineal, que consistió en la aplicación de una carga puntual y la marcación de puntos fijos de los componentes, como se muestra en las figuras 8 y 9.

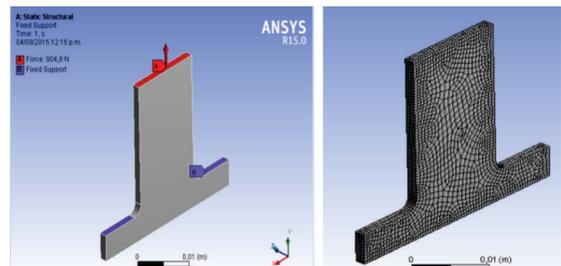


Figura 8. Carga radial, puntos fijos del álabes y enmallado
Fuente: elaboración propia.



Figura 9. Soportes fijos en los anillos retenedores y enmallado
Fuente: elaboración propia.

Para el desarrollo de este análisis se tuvo presente la aplicación de una única carga en cada componente, sin tener en cuenta factores como la temperatura, fuerzas de sustentación y de resistencia, entre otras; por tal motivo se obtuvieron factores de seguridad superiores a 1,5, lo que para aviación y máquinas térmicas está dentro de los parámetros aceptables (Oñate, 1981, p. 485) y deformaciones de aproximadamente 6 micrómetros en cada componente, como se observa en la figura 10. No obstante, estos valores pueden variar si se tienen en cuenta los factores mencionados anteriormente.

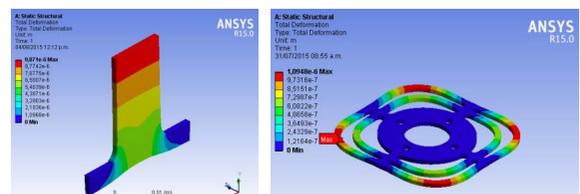


Figura 10. Deformación álabes rotor y anillo retenedor
Fuente: elaboración propia.

Fabricación de los componentes

Al modelar cada uno de los componentes del prototipo de la turbina libre y realizar los análisis estructurales a sus piezas más críticas, se seleccionó el acero inoxidable como el material más adecuado para su construcción, debido a su resistencia térmica (ver <http://inco.com.uy/institucional/propiedades/>). Se prosiguió con el proceso de fabricación y manufactura de cada uno de sus componentes; según Llanos Serna, Mantilla Barbosa y Zambrano Ángel (2008) "para facilitar el proceso de fabricación se debe empezar por el disco rotor, debido a que es el componente dinámico que puede afectar la fabricación de los demás componentes" (p. 217). Una vez fabricado el disco rotor se procedió a fabricar los demás componentes, como disco estator, alabes de estator, eje, *spinner*, entre otros, en los que se llevó a cabo procesos de maquinado, fresado, perforación, soldado, pulido y pintura (figuras 11, 12 y 13).



Figura 11. Conjunto rotor de la turbina libre
Fuente: elaboración propia.



Figura 12. Conjunto estator de la turbina libre
Fuente: elaboración propia.
Prototipo final de turbina libre



Figura 13. Ensamble final turbina libre
Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Con base en el motor RGG1, se diseñó y fabricó una turbina libre para la generación de energía, con lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:
El comportamiento de la presión en la sección de rotor no es constante, debido a la variación de temperatura

que existe entre las secciones 2 y 3 de la turbina libre.

El torque generado por la turbina libre es mínimo en comparación con la potencia obtenida: por tal razón, para aumentar este valor de torque se puede aumentar el número de cascadas de álabes de rotor en la turbina.

Es recomendable realizar recubrimientos cerámicos a los álabes de rotor, rodamientos y paredes internas del case de turbina, con el fin de hacerlos más resistentes a las altas temperaturas de operación de la turbina libre.

Fue necesario realizar ajustes a algunas de las piezas construidas, debido a las mínimas tolerancias que existían entre dichas piezas, las cuales se deben analizar en el caso de un modelo funcional.

Debido a que se trataba de un prototipo no funcional, no se realizaron pruebas de operación que aclararan que los resultados obtenidos pueden llegar a variar en el caso de un modelo funcional.

Referencias

- ▶ Cengel, Y. y Boles M. (2009). *Termodinámica* (6ta. edición). México, D. C.: McGraw-Hill.
- ▶ Cuesta Álvarez, M. (1980). *Motores a reacción. Tecnología y operación de vuelo* (5ta. edición). Madrid. Paraninfo.
- ▶ Escobar Garzón, A. (2008). *Diseño y construcción de turborreactores de bajo flujo másico*. Bogotá: Militar Aeronáutica.
- ▶ González Olarte O, Gutiérrez Novoa J. y Quintero Rodríguez J. (2014). *Diseño y Construcción de un Turbo Jet Bajo el Funcionamiento de un Turbo Cargador* (Tesis de grado). Bogotá, Fundación Universitaria Los Libertadores.
- ▶ González Bejarano, L. y Flórez Castiblanco, A. (2013). *Diseño y simulación de una turbina para un motor turbojet CJ 610-4* (Tesis de grado). Bogotá, Universidad de San Buenaventura.
- ▶ Saravanamutto, H. I. H. (1983). *Gas turbine theory* (4ta. edición). Cambridge: Macommo.
- ▶ INCO. (s. f.). *Aceros inoxidables. Composición Química del Acero Inoxidable 304*. Recuperado el 10 de julio de 2015, de <<http://inco.com.uy/institucional/propiedades/>>
- ▶ Llanos Serna P, Mantilla Barbosa J. y Zambrano Ángel J. (2008). *Model design engine turbofan JP1* (Tesis de grado). Bogotá, Universidad de San Buenaventura.
- ▶ Mattingly, J. D. (2006). *Elements of propulsion: gas turbines and rockets*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Virginia.
- ▶ Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (4ta. edición). México, D. F.: Pearson Educación.
- ▶ Oñate, E. (1981). *Turboreactores. Teoría, sistemas y propulsión de aviones*. Madrid. Paraninfo.
- ▶ Sáinz Díez, V. (2007). *El motor de reacción y sus sistemas auxiliares* (9na. edición). Madrid. Paraninfo.