

**Título del Proyecto de Investigación  
al que corresponde el Reporte Técnico:**

MODELADO NUMÉRICO DE ESFUERZOS EN ÁLABES DE  
TURBINA CON RECUBRIMIENTO TÉRMICO

**Tipo de financiamiento**

Con financiamiento externo

**Tipo de Reporte**

**Parcial**

**Final**

**Autor (es) del reporte técnico:**

Oscar Tenango Pirin  
Elva Lilia Reynoso Jardón  
Yahir de Jesús Mariaca Beltrán  
Raúl Neco Caberta  
Juan Carlos García Castrejón  
Yuri Sara Hernández Demesa

## **EFECTO DE LA BARRERA TÉRMICA PROTECTORA EN LOS ESFUERZOS DE LOS COMPONENTES DE UNA MICROTURBINA DE GAS**

### **Resumen del reporte técnico en español (máximo 250 palabras)**

En este proyecto de investigación se investigaron los estados de esfuerzos térmicos y mecánicos en componentes críticos de una turbina de gas. Para los cálculos, se tomó en cuenta un recubrimiento cerámico en la superficie de los componentes de la turbina (tobera y álabe) compuesto de distintos materiales. La geometría y condiciones de frontera se obtuvieron de estudios reportados en la literatura. Para la validación del modelo se comparó con datos experimentales reportados en la literatura. Para los cálculos se emplearon métodos numéricos como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y el Método de Elemento Finito (FEM). Los resultados permitieron determinar el recubrimiento más apto para la protección de la turbina y los niveles de esfuerzo y temperatura desarrollados. Estos resultados son útiles para determinar una estimación de vida útil de la turbina, mejorar el diseño de esta, y optimizar los métodos de enfriamiento de los álabes.

### **Resumen del reporte técnico en inglés (máximo 250 palabras):**

In this Project, thermal and mechanical stress produced in critical components of a gas microturbine were investigated. In calculations, several thermal barrier coating (TBC) on the blades and nozzle were considered. Geometry and boundary conditions were obtained from literature. To validate the model, results were compared with data from literature. Computational fluid dynamics and Finite element method were used to determine the suitable TBC, and to calculate stress and temperature. These results allowed to estimate turbine resistance, improve the design and optimize cooling methods on the microturbine blades.

**Palabras clave:** barrera térmica protectora, microturbina de gas, esfuerzos térmicos

**Usuarios potenciales (del proyecto de investigación)**

Investigadores y estudiantes de diversas áreas de ingeniería como mecánica, automotriz y aeronáutica de nivel licenciatura y posgrado.

**Reconocimientos**

El titular agradece al PRODEP por el apoyo otorgado, a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por proporcionar las instalaciones necesarias para el desarrollo del proyecto, a los investigadores que colaboraron con la realización del proyecto, y a los estudiantes involucrados con la realización de su tesis correspondiente.

**1. Introducción**

La conversión de energía en las turbinas se lleva a cabo en los álabes y las condiciones más extremas de temperatura se presentan en estos componentes debido al contacto con los gases calientes provenientes de la sección de combustión. Durante la operación, los álabes están sujetos a fuerzas producidas por la expansión de los gases y la rotación. Como resultado, se presentan distribuciones no uniformes de temperatura y presión los cuales dan origen a los esfuerzos térmicos y mecánicos. El proyecto propone examinar las temperaturas y estados de esfuerzo generados en un álabe simulando las condiciones de arranque de la turbina. Para las simulaciones se tomarán en cuenta los cambios en las

propiedades del material con la temperatura. En el álabe se considerará un recubrimiento cerámico donde se variará el material del que este compuesto.

## **2. Planteamiento**

La mayoría de los estudios disponibles en la literatura de turbinas convencionales se enfocan en analizar los rotores, minimizando la atención a las toberas y álabes, a pesar de ser componentes críticos que tienden a fallar. Entonces, la información de este tipo de estudios en turbinas y microturbinas es escaso. Entonces, las hipótesis son:

-Los recubrimientos cerámicos reducirán de forma considerable los niveles de temperatura

en los componentes de la turbina lo que beneficiaría su vida útil.

-Como consecuencia del empleo del recubrimiento, la diferencia entre las temperaturas de la

superficie del recubrimiento que tiene contacto con el fluido y la superficie que tiene contacto con el álabe será mayor. Esto propiciaría el desarrollo de esfuerzos térmicos más altos.

-Al final del arranque, los esfuerzos en el álabe se verán reducidos por el empleo de la capa térmica y la temperatura alcanzará sus niveles más altos.

### **2.1 Antecedentes**

Ciclos transitorios como los arranques en frío, paros y cambios de carga en las turbinas también propician cambios no uniformes de temperatura y presión en los álabes. Durante estos ciclos los niveles de esfuerzos térmicos alcanzan sus niveles más altos lo que produce daños a los materiales debido a la inducción de fatiga de bajo ciclo (LCF). Varios estudios se han dirigido en estudiar los campos de esfuerzos y temperaturas durante los ciclos de arranque. Nowak y Rusin (2004) encontraron que las velocidades de arranque influyen en los estados de esfuerzo y durabilidad de los componentes de la turbina. Por otro lado, la influencia que tienen distintas curvas de arranque en los niveles de esfuerzo en las secciones de tobera y rotor de una microturbina de gas fueron estudiadas por Tenango-Pirin et al. (2016). Sus resultados mostraron que los niveles de

esfuerzo se pueden reducir si se selecciona la curva adecuada. Debido a la complejidad de realizar mediciones durante la operación de la turbina, el modelado numérico juega un papel vital en la predicción de temperaturas, esfuerzos e incluso vida útil de los componentes de la máquina.

Por otro lado, varios estudios se han enfocado en estudiar los esfuerzos térmicos desarrollados en el rotor de las turbinas. Dong Mei et al. (2017) determinaron los puntos de esfuerzos térmicos más altos desarrollados en el rotor de una turbina de vapor para varias configuraciones del arranque. Mediante métodos numéricos lograron reducir el tiempo de arranque y los niveles de esfuerzo. Guo et al. (2016) estudiaron el efecto del coeficiente de transferencia de calor (HTC) en el modelado de temperaturas y esfuerzos en un rotor de turbina de vapor de alta presión durante el arranque. Sus resultados mostraron que bajos valores del HTC influyen de mayor manera en la predicción de temperaturas. Además, sugieren emplear la ecuación propuesta por Sarkar et al. (1993) para el cálculo de HTC. Para reducir los niveles de esfuerzo, algunos estudios [Ivanovskii et al., 2008] mostraron que el precalentamiento de los materiales reduce las elongaciones térmicas. La selección del material apropiado para la manufacturación de la turbina también influye en la elongación debido a sus propiedades mecánicas [Kosman et al., 2009; Mustafa et al., 2008]. Otros factores que da origen al desarrollo de esfuerzos son cambios bruscos en la geometría de los álabes [Zhu et al., 2017] y la temperatura inicial del material [Ivanovskii et al., 2008].

Para proteger a los álabes de las altas temperaturas, uno de los métodos más frecuentes es el empleo de barreras térmicas protectoras (TBCs). Las barreras térmicas protectoras son recubrimientos en la superficie de los álabes cuyo objetivo es reducir la transferencia del calor entre el fluido y el álabe. Las TBCs están compuestas principalmente por materiales cerámicos de baja conductividad térmica y pueden ser de una capa o multicapa. Sin embargo, las TBCs también pueden fallar por consecuencia de esfuerzos térmicos que ocurren principalmente en las etapas de arranque y enfriado [Yang et al., 2011]. Por esta razón es necesario investigar la evolución de esfuerzos en álabes con recubrimiento para identificar los factores que influyen en su desarrollo y buscar la forma de reducirlos. En trabajos previos [Tenango-Pirin et al., 2016], se han modelado curvas de arranque en turbinas, sin embargo, en los cálculos no se consideró ningún método de enfriamiento o

TBC. Las propiedades físicas del material, las cuales cambian con la temperatura y pueden proveer de resultados más precisos, fueron consideradas constantes. Además, la mayoría de los estudios reportados en la literatura se centran en los rotores y álabes. Solo algunos investigadores han estudiado las toberas [Rossette et al., 2009] a pesar de que éstas tienen contacto con los gases cuando se encuentran más calientes. Entonces, en este proyecto se propone estudiar los álabes con y sin recubrimiento, y las toberas. Los resultados obtenidos ayudarán a determinar los niveles de esfuerzo y su variación durante la curva de arranque de una turbina que opere bajo ciertas condiciones de operación.

## **2.2 Marco teórico**

Las turbinas de gas son turbomáquinas térmicas cuya función es convertir la energía cinética y térmica de un gas de alta temperatura y presión en energía mecánica en la flecha de un rotor. La eficiencia de una turbina está dada por la temperatura de entrada la cual puede superar los 1000 K [Xie et al., 2014]. Entre más alta sea esta temperatura mayor será la eficiencia térmica de la máquina [Cengel y Boles, 1999]. Sin embargo, los niveles de temperatura están limitados por la resistencia del material y la producción de gases contaminantes.

Desde el punto de vista de la resistencia de los materiales, la operación de la turbina debe estar dentro de un rango adecuado donde la máquina sea capaz de soportar los niveles de temperatura, esfuerzo y vibraciones para asegurar un funcionamiento continuo. En caso contrario, algunos de sus componentes pueden fallar lo que se traduce en costosas reparaciones y grandes pérdidas económicas por el paro de la máquina. Entonces, se requiere de análisis térmicos y estructurales para asegurar un diseño y operación adecuados.

Los componentes principales de un motor de turbina de gas, en su forma más simple, son el compresor, la cámara de combustión y la turbina de expansión. Cabe mencionar que estos tres componentes están montados sobre un mismo eje. Este proyecto se centra en la turbina de expansión y sus componentes principales, los cuales son las toberas, los álabes y el rotor. Las toberas son componentes fijos cuya función es redireccionar el flujo de gas para que coincida con el borde de ataque de los álabes. El gas, el cual se encuentra a alta temperatura y presión, se expande en la sección de los álabes. En este proceso ocurre la

conversión de energía térmica y cinética del gas en energía mecánica en los álabes, los cuales hace rotar al rotor. A la salida de la turbina, el rotor se encuentra comúnmente conectado a un generador, el cual produce energía eléctrica.

El álabe consta de tres partes principales: el borde de ataque, el borde de salida, el lado presión y el lado succión. El borde de ataque se encuentra en el frente y es la zona que entra en contacto en primer lugar con el gas. Su función es dividir el flujo de gas hacia los lados presión y succión. El borde de salida es la sección final del álabe y tiene la función de reducir la zona de baja presión posterior al álabe. El lado presión, es el lado donde ocurre la conversión de energía antes mencionada, en esta zona ocurre el mayor contacto del gas con el álabe y, por esta razón, la presión es más alta que en otras regiones. Finalmente. El lado succión, es el lado opuesto al lado presión, y su función es evacuar el gas y reducir el desprendimiento de la capa límite. Cada una de estas secciones fueron estudiadas en la sección de resultados, la cual se muestra más adelante.

### **3. Objetivos (general y específicos)**

El objetivo general es estudiar, usando métodos numéricos, el efecto que tiene el uso de distintos materiales como TBC en los niveles de temperatura y esfuerzo de los componentes de la turbina. Los datos serán complementados con estudios reportados en la literatura.

Los objetivos específicos son:

-Identificar las zonas con mayor temperatura en cada componente. Los niveles de temperatura alcanzados deben de estar en una región segura alejados del punto de fusión del material.

-Identificar los parámetros de operación que más influyen en los niveles de esfuerzo, para buscar la forma de reducirlos y prolongar la vida útil del material.

-Determinar la eficacia de los materiales estudiados en el aislamiento térmico y en la reducción de esfuerzos.

-Aplicar la Dinámica de fluidos computacional (CFD) y el método de elemento finito (FEM) para resolver un problema de Interacción Fluido-Estructura (FSI) sin la necesidad de emplear algoritmos externos.

#### 4. Metodología

Una serie de tareas fueron desarrolladas para alcanzar los objetivos planteados. Se resolvió un problema de transferencia de calor conjugado (CHT) que incluye la transferencia de calor del flujo al material por convección y después la conducción de calor dentro de los componentes. Para la resolución numérica de un problema CHT se aplicó un método conocido como Interacción Fluido-Estructura (FSI) en cual fue resuelto con métodos numéricos. A continuación, se describen los pasos usados para la metodología en el desarrollo del proyecto.

Etapa 1. Construcción de la geometría. Se realizó el modelo correspondiente a un pasaje de la microturbina, el cual se muestra en la Figura 1a, donde también se indican sus partes principales y algunas condiciones de frontera. Se modelaron las secciones de toberas y álabes de la turbina para obtener resultados más precisos. En esta etapa también se incluyó una actualización de revisión exhaustiva de la literatura sobre el tema.

Etapa 2. Análisis de convergencia de malla. Una vez que se cuenta con el modelo geométrico, se realiza la discretización de los dominios. Se empleó el programa Ansys diseñado para mallar. Para asegurar que el mallado no afecte los resultados, se llevó a cabo un análisis de convergencia de malla. Después de analizar distintos mallados, se optó por emplear un mallado conformado por 6.23 millones de elementos, el cual se muestra en la Figura 1b. Cabe mencionar que dicho dominio mallado también fue usado posteriormente para los cálculos de FEM en la etapa 5.

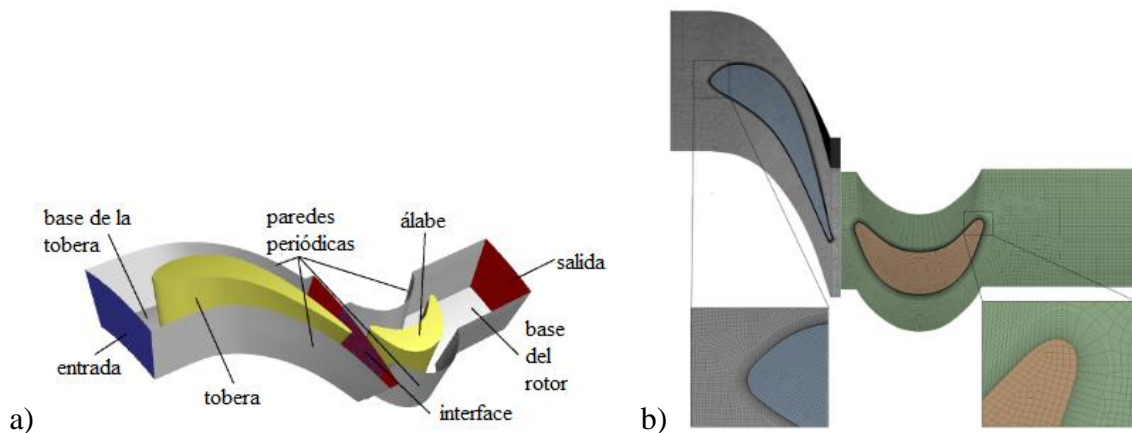


Figura 1. Modelo numérico de la microturbina: a) modelo del pasaje, y b) mallado usado para los cálculos.



Etapa 3. Definición de condiciones de frontera. Se definieron y asignaron las condiciones de frontera correspondientes al modelo numérico. Algunas condiciones de frontera y operación fueron tomadas de estudios previos, mientras que otras tuvieron que ser definidas basándose en la literatura consultada. Por otro lado, en esta etapa se definieron los modelos y algoritmos numéricos para realizar los cálculos térmicos. En cuanto a las barreras térmicas, se estudiaron cuatro materiales distintos: 8YSZ,  $Mg_2SiO_4$ ,  $Y_3Ce_7Ta_2O_{23.5}$  y  $Yb_3Ce_7Ta_2O_{23.5}$ , cuyas propiedades se térmicas se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los materiales usados como TBC.

Material	Conductividad térmica (W/mK)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kg.K)
8YSZ	2.2	3610	5.5
$Mg_2SiO_4$	1.7	3210	177000
$Y_3Ce_7Ta_2O_{23.5}$	1.7	7245	472
$Yb_3Ce_7Ta_2O_{23.5}$	1.4	6321	431

Etapa 4. Aplicación de dinámica de fluidos computacional. En esta etapa se modelaron los campos de flujo y temperatura en la turbina. Se resolvieron las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía empleando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con el programa Ansys. Los cálculos se realizaron por casos, entre los que se encuentran los distintos espesores y materiales que conforman los recubrimientos térmicos indicados en la Tabla 1. Para resolver la turbulencia, se empleó el modelo k-ε el cual ha sido ampliamente en la literatura para resolver casos FSI con suficiente precisión. Además, los resultados obtenidos en este proyecto tuvieron buena concordancia al compararlos con datos experimentales reportados en la literatura, como se muestra en la Figura 2. La comparación de perfiles de temperatura adimensional obtenida en este trabajo se comparó con los reportados por Dong et al (2009). En el eje horizontal se muestra la posición adimensional.

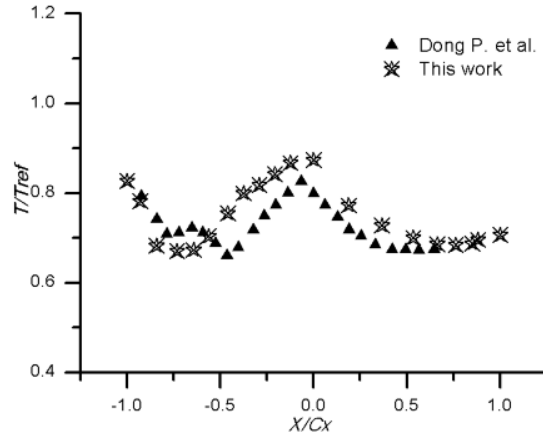


Figura 2. Comparación de la distribución de temperatura de la tobera con la literatura.

Etapa 5. Exportar resultados de CFD a FEM. En esta etapa del proceso se buscó la forma más viable para enviar los resultados de temperatura y presión obtenidos con CFD. La transferencia de datos se realizó dentro del entorno de trabajo de Workbench de Ansys siguiendo la metodología de FSI.

Etapa 6. Aplicación del Método de Elemento Finito. Se empleó el método de FEM para los cálculos estructurales. Los campos de temperatura y presión en las paredes de los materiales predichos con CFD en cada caso se usaron como carga en los modelos de FEM. Por otro lado, los esfuerzos térmicos se calcularon usando las propiedades de los materiales como el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, el coeficiente de expansión térmica y la temperatura.

Etapa 7. Análisis de resultados. Esta etapa corresponde al post-proceso de CFD y FEM, y consiste en el análisis de resultados. Una descripción más detallada de esta etapa se discute más adelante en este reporte.

## 5. Instituciones, organismos o empresas de los sectores social, público o productivo participantes (Si aplica)

Instituciones participantes:

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Universidad Autónoma del Estado de Morelos

## 6. Resultados

Se analizó la distribución de temperaturas y deformación de los materiales de la turbina. La distribución de temperatura en las toberas para cada material se muestra en la Figura 3. Se puede observar el efecto que tuvo cada material en la composición de la TBC, y como el empleo de barreras térmicas protectores reduce la temperatura superficial de los componentes de la turbina debido al aislamiento térmico. Entre los materiales estudiados, el compuesto por  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  resultó ser el más efectivo al reducir en mayor medida la transferencia de calor.

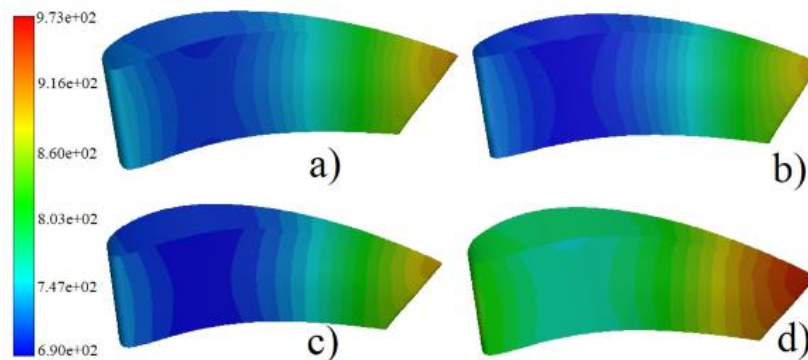


Figura 3. Distribución de temperaturas en las toberas con cada recubrimiento: a) 8YSZ, b)  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , c)  $\text{Y}_3\text{Ce}_7\text{Ta}_2\text{O}_{23.5}$  y d)  $\text{Yb}_3\text{Ce}_7\text{Ta}_2\text{O}_{23.5}$ .

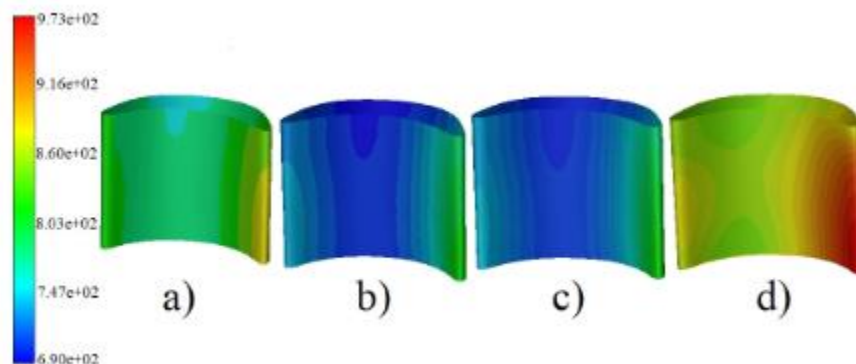


Figura 4. Distribución de temperaturas en el álabe con cada recubrimiento: a) 8YSZ, b)  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , c)  $\text{Y}_3\text{Ce}_7\text{Ta}_2\text{O}_{23.5}$  y d)  $\text{Yb}_3\text{Ce}_7\text{Ta}_2\text{O}_{23.5}$ .

Mientras tanto, la distribución de temperatura en el álabe para cada material estudiado se observa en la Figura 4. De forma similar a las toberas, el material usado para la composición de cada TBC influyo de forma notable en la temperatura superficial,

reduciéndola debido a la reducción de la transferencia de calor entre el gas y el componente. En este caso, también la TBC compuesta por  $Mg_2SiO_4$  resultó ser la más efectiva ya que muestra los niveles de temperatura superficiales más bajos en comparación a los otros materiales.

Por otro lado, el desarrollo de esfuerzos térmicos y mecánicos totales se representaron mediante los esfuerzos de Von-Mises. De esta forma se obtuvieron las zonas críticas que son más propensas a fallar por fatiga térmica. Estos resultados, además, permitieron estudiar el espesor y materiales óptimos para el recubrimiento que sería utilizado para proteger los componentes de la microturbina.

En las Figuras 5 y 6 se muestra la distribución de esfuerzos en la tobera y el álabe, respectivamente. Los esfuerzos más altos rebasaron los 632 MPa, sin embargo, estuvieron alejados del límite elástico del material. En la Figura 5, se puede observar una gran concentración de esfuerzos en la parte inferior del borde de salida. Esto es consecuencia del efecto combinado de las restricciones a las elongaciones del material y a que en esa zona se desarrollaron las temperaturas más altas, como indicó la Figura 3. Además, se muestra otra zona de concentración de esfuerzos en la parte superior del lado presión, el cual, de forma similar, se le atribuye a que en ese lado se incrementan las temperaturas debido a la expansión del gas. Los niveles de esfuerzo más bajos se obtuvieron con el uso de una TBC compuesta por  $Mg_2SiO_4$ .

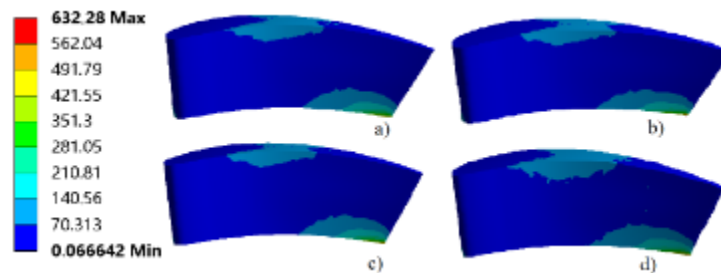


Figura 5. Distribución de esfuerzos en la tobera con cada recubrimiento: a) 8YSZ, b)  $Mg_2SiO_4$ , c)  $Y_3Ce_7Ta_2O_{23.5}$  y d)  $Yb_3Ce_7Ta_2O_{23.5}$ .

En la Figura 5 se ilustra la distribución de esfuerzos en el álabe. Los niveles de esfuerzo más altos, arriba de 100 MPa, se obtuvieron con 8YSZ. En contraste, los niveles de esfuerzo más bajos se obtuvieron con  $Mg_2SiO_4$  y  $Y_3Ce_7Ta_2O_{23.5}$ . Se pueden observar zonas con grandes concentraciones de esfuerzo en la base del álabe, tanto en el borde de ataque como en el borde de salida. Esto se le atribuye a que en estas zonas se presentaron las temperaturas más altas, como se mostró en la Figura 4. Además, las restricciones en toda la base y los cambios bruscos en la geometría y sección transversal también propiciaron el desarrollo de estos niveles de esfuerzo. Las zonas menos cargadas de esfuerzo se ubicaron en la punta de los álabes donde los materiales tienen libertad de expandirse libremente.

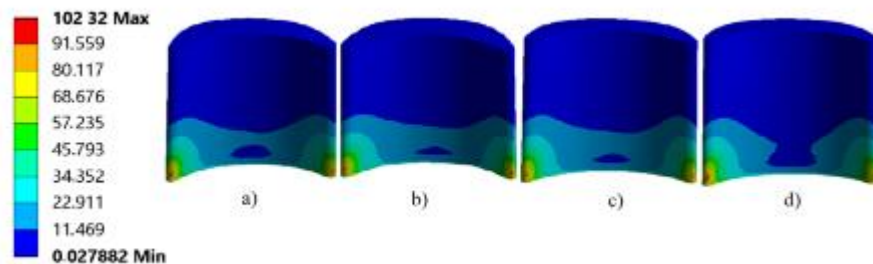


Figura 6. Distribución de esfuerzos en el álabe con cada recubrimiento: a) 8YSZ, b)  $Mg_2SiO_4$ , c)  $Y_3Ce_7Ta_2O_{23.5}$  y d)  $Yb_3Ce_7Ta_2O_{23.5}$ .

En la Tabla 2. Se resumen los niveles de esfuerzo más altos obtenidos en cada componente, con cada material que compone a la TBC. Los valores de esfuerzo reportados con TBC se compararon con los valores obtenidos sin TBC. Se puede observar que el uso de alguna TBCs permite reducir los niveles de esfuerzo en cada componente. Los niveles de esfuerzo estuvieron por debajo del esfuerzo de cedencia del material de la turbina. El uso de una TBC compuesta por 8YSZ mostró los niveles más altos de esfuerzo, mientras que los materiales  $Mg_2SiO_4$ ,  $Y_3Ce_7Ta_2O_{23.5}$  y  $Yb_3Ce_7Ta_2O_{23.5}$  mostraron niveles similares de esfuerzo tanto en la tobera como en el álabe. También se observó que conforme lo niveles de temperatura se reducen ocurre lo mismo con los niveles de esfuerzo en el álabe. Si se comparan los niveles de esfuerzo sin barrera térmico con el uso de alguna de ellas, se observa una reducción de esfuerzo de alrededor de 24 MPa.

Tabla 2. Esfuerzos máximos de Von Mises en los componentes de la MTG.

Material	Esfuerzos en la tobera (MPa)	Esfuerzos en el álabe (MPa)
No TBC	632.3	126.2
8YSZ	601.0	102.6
Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	591.4	102.3
Y <sub>3</sub> Ce <sub>7</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>23.5</sub>	591.9	102.3
Yb <sub>3</sub> Ce <sub>7</sub> Ta <sub>2</sub> O <sub>23.5</sub>	593.3	102.4

## 7. Productos generados

Publicaciones:

a) Artículo en revista indexada en JCR. El título del artículo es “Effect of thermal barrier coating on the thermal stress of a gas microturbine Blades and Nozzle”. Fue enviado a la revista Strojinski Vestnik / Journal of Mechanical Engineering (SV-JME) con ISSN 00392-480 y 2536-2948 (online). El artículo fue publicado en Octubre del 2020.

Recursos humanos

a) Tesis de Licenciatura de la alumna Mariana Guadalupe Rivera Gutiérrez. El título de la tesis es “Análisis de la temperatura de una microturbina de gas con recubrimiento térmico” cuya defensa fue el día 24 de Mayo del 2019. El estado del estudiante es titulado.

b) Tesis de Licenciatura del alumno Daniel Alonso Devora Stephenson. El título de la tesis es “Evaluación de materiales avanzados para una microturbina de gas con recubrimiento térmico” cuya defensa fue el día 29 de Noviembre del 2019. El estado del estudiante es titulado.

Como comprobante de lo antes mencionado, se adjunta carta de liberación emitida por parte del Prodep, donde se da por finalizado el proyecto.

## **8. Conclusiones**

Se construyó un modelo numérico de una microturbina de gas que permitió alcanzar el objetivo general planteado.

Los resultados permitieron obtener los niveles de esfuerzo y así identificar las zonas críticas en los componentes de la turbina. Además, de los materiales estudiados usados como TBC, se encontró la influencia de estos en los niveles de temperatura y esfuerzo. Se observó que el uso de TBC permite una reducción en los niveles de temperatura y esfuerzo. Entre los materiales estudiados, se determinó el más efectivo en términos de aislamiento térmico y reducción de esfuerzos. Además, también se observó que las restricciones promueven el desarrollo de zonas con altas concentraciones de esfuerzo. Con estos resultados se asegura una operación confiable de la turbina bajo determinadas condiciones de operación.

Por otro lado, se implementaron con éxito los métodos de CFD y FEM, los cuales permitieron identificar la barrera térmica que proporcionará la mayor protección a los componentes de la turbina.

## **9. Mecanismos de transferencia. (Si aplica)**

## **10. Contribución e impacto del proyecto**

Desde el punto de vista académico, la adquisición de equipo de cómputo y oficina permitirá realizar futuros estudios más allá de turbomaquinaria, como pueden ser componentes de sistemas automotrices y control y reducción de emisiones contaminantes. Además, los métodos numéricos pueden ser empleados en clase para acrecentar el aprendizaje del alumno.

Una aplicación exitosa de la metodología daría paso al desarrollo de nuevas propuestas de investigación para realizar análisis térmicos y estructurales en componentes automotrices que tienen contacto con fluidos de alta temperatura. Este tipo de métodos son empleados cada vez más para el diseño de máquinas o componentes de máquinas debido al creciente poder

en equipo de cómputo lo cual permite realizar cálculos cada vez más complejos. Por otro lado, en los aspectos industrial y energético, en la literatura hay falta de estudios enfocados en microturbinas. Entonces, los resultados obtenidos en este proyecto ayudaran a mejorar los nuevos diseños de álabes con el fin de reducir esfuerzos y prolongar la vida útil de la máquina. Además, se presentará información sobre la curva de arranque lo cual puede ayudar en el proceso de diseño y operación de las turbinas.

### **11. Impacto económico, social y/o ambiental en la región**

Impacto económico: el uso de TBC para proteger a los componentes de las turbinas permite prolongar su vida útil lo cual reduce el costo de reparaciones, reemplazamientos o paros no programados de dichas máquinas. Además, evita el uso de otras tecnologías costosas y complejas, como el uso de orificios de enfriamiento, para reducir la temperatura en los álabes.

Impacto social: la adquisición de equipo, y la capacitación de estudiantes en su uso permitirán realizar análisis en áreas como la mecánica, automotriz y aeronáutica. Además, la metodología puede ser empleada en infinidad de situaciones cotidianas, industriales y de investigación.

Impacto ambiental: con los resultados obtenidos en este proyecto, es posible aumentar su eficiencia de las microturbinas prolongando su vida útil y reduciendo las emisiones contaminantes que liberan a la atmósfera. Además, con el enfriamiento de los álabes, es posible utilizar relaciones aire-combustible más altas, las cuales permiten aumentar la eficiencia de la combustión y, de esta forma, reducir gases de efecto invernadero y ahorrar combustible.

### **12. Referencias (bibliografía)**

Dong-Mei Ji, Jia-Qi Sun, Yue Dui, Jian-Xing Ren, The Optimization of the Start-up Scheduling for a 320 MW Steam Turbine, Energy (2017). 2017.02.139.

Dong, P., Wang, Q., Guo, Z., Huang, H., Feng, G. (2009). Conjugate calculation of gas turbine vanes cooled with leading edge films. Chinese Journal of Aeronautics, vol. 22, no. 2, p. 145-152.



- Guo, J., Xie, D., Zhang, H., Jiang, W., & Zhou, Y. (2016). Effect of heat transfer coefficient of steam turbine rotor on thermal stress field under off-design condition. *Frontiers in Energy*, 10(1), 57.
- Ivanovskii, A. A., Pokhoriler, V. L., & Goloshumova, V. N. (2008). Calculating the thermally stressed state of the high and medium pressure rotors of a T-250/300-240 turbine in the labyrinth seal zone. *Power Technology and Engineering*, 42(2), 100-104.
- Kosman, W., Roskosz, M., & Nawrat, K. (2009). Thermal elongations in steam turbines with welded rotors made of advanced materials at supercritical steam parameters. *Applied Thermal Engineering*, 29(16), 3386-3393.
- Mustafa, A. H., Hashmi, M. S., Yilbas, B. S., & Sunar, M. (2008). Investigation into thermal stresses in gas turbine transition-piece: Influence of material properties on stress levels. *journal of materials processing technology*, 201(1), 369-373.
- Nowak G. and Rusin A. (2004). Lifetime deterioration of turbine components during startups. *Operation Maintenance and Materials Issues*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2004.
- Rossette, A. H., Mazur, Z., Demeulenaere, A., & Hernández, J. R. L. (2009). The effect of start-up cycle in ceramic coating used as thermal barrier for a gas turbine bucket. *Applied thermal engineering*, 29(14), 3056-3065.
- Sarkar D., Mukherjee P. K & Sen S. K. (1993). Approximate analysis of steady state heat convection in an induction motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 8(1): 78–84
- Tenango-Pirin, O., García, J. C., Castro-Gómez, L., Rodríguez, J. A., Sierra, F., De Santiago, O., & Rodríguez-Lelis, J. M. (2016). Effect of the Modification of the Start-Up Sequence on the Thermal Stresses for a Microgas Turbine. *International Journal of Rotating Machinery*, 2016.
- Xie, Y., Lu, K., Liu, L., & Xie, G. (2014). Fluid-thermal-structural coupled analysis of a radial inflow micro gas turbine using computational fluid dynamics and computational solid mechanics. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- Yang, L., Zhou, Y. C., & Lu, C. (2011). Damage evolution and rupture time prediction in thermal barrier coatings subjected to cyclic heating and cooling: An acoustic emission method. *Acta Materialia*, 59(17), 6519-6529.

## 13. Anexos

### 13.1 Taxonomía de los Roles de Colaborador (con las actividades logradas)

<b>Roles</b>	<b>Definición de los roles</b>	<b>Nombre de él(la) investigador(a)</b>	<b>Figura</b>	<b>Grado de contribución</b>	<b>Actividades logradas durante el proyecto</b>	<b>Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto</b>
<b>1. Responsabilidad de la dirección del proyecto</b>	Coordinar la planificación y ejecución de la actividad de investigación. Organiza los roles de cada colaborador, tiene la habilidad de identificar potenciales de cada individuo para generar una sinergia de equipo colaborativo.	Oscar Tenango Pirin	Director del proyecto	Principal	Realizó la planificación y ejecución de cada etapa del proyecto, así como la designación del rol que cada integrante desarrolló	10
<b>2. Responsabilidad de supervisión</b>	Elaborar la planificación de las actividades de la investigación (cronogramas y controles de seguimiento), describe los roles identificados por el director del proyecto y facilita el apoyo constante a todos los roles para conseguir un trabajo integral, coherente y que llegue a buen término.	Elva Lilia Reynoso Jardón	Supervisor del proyecto	De apoyo	Revisó que cada etapa planteada en el proyecto se cumpliera satisfactoriamente en tiempo y forma	8
<b>3. Realización y redacción de la propuesta</b>	Preparación, creación y redacción de la propuesta de investigación, específicamente la redacción, revisión de coherencia del texto, presentación de los datos y la normatividad aplicable para garantizar el cumplimiento de los	Juan Carlos García Castrejón	Redactor de la propuesta	Principal	Redacción de cada una de las partes que conforman el reporte entregado a Prodep, con el apoyo del revisor	8

	requisitos.					
<b>4. Desarrollo o diseño de la metodología</b>	Contribuir con el diseño de la metodología, modelos a implementar y el sustento teórico, empírico y científico para la aplicabilidad de los instrumentos en la ejecución del proyecto.	Yahir Mariaca Beltrán	Diseñador de la metodología	De apoyo	Sugirió y supervisó la metodología empleada para el desarrollo del proyecto y obtención de resultados	8
<b>5. Recopilación/recolección de datos e información</b>	Ejecuta las estrategias propuestas en acciones encaminadas a obtener la información, haciendo la recopilación de datos y la inclusión de la evidencia en el proceso.	Raul Neco Caberta	Recopilador de datos	De apoyo	Apoyo en la recolección y análisis de los datos obtenidos en cada cálculo	8
<b>6. Elaboración del análisis formal de la investigación</b>	Aplicar métodos estadísticos, matemáticos, computacionales, teóricos u otras técnicas formales para analizar o sintetizar los datos del estudio. Verifica los resultados preliminares de cada etapa del análisis, los experimentos implementados y otros productos comprometidos en el proyecto.	Yuri Sara Hernández Demesa	Analista de datos	De apoyo	Aplicación de métodos numéricos de CFD, así como análisis estadístico de datos y señales obtenidas en los resultados para obtener las publicaciones correspondientes	8
<b>7. Preparación, creación y/o presentación de los productos</b>	Preparar la redacción del reporté técnico de avance parcial y el reporte técnico final. Se hace la revisión crítica, la recopilación de las observaciones y	Oscar Tenango Pirin	Editor de reportes técnicos	Principal	Redacción del reporte final entregado del prodep, así como del presente reporte técnico para su respectiva	10

<b>entregables</b>	comentarios del grupo de investigación. Y finalmente se procede a la edición del documento a entregar.				validación	
--------------------	--	--	--	--	------------	--

### 13.1.1 Estudiantes participantes en el proyecto

<b>Nombre de estudiante(s)</b>	<b>Matrícula</b>	<b>Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto</b>	<b>Actividades logradas en la ejecución del proyecto</b>
Mariana Guadalupe Rivera Gutiérrez	132568	8	Realizó y concluyó satisfactoriamente su tesis de licenciatura. Entre las actividades realizadas se encuentran la realización de cálculos, análisis de datos y escaneado 3D de algunas piezas mecánicas.
Daniel Alonso Dévora Stephenson	139020	8	Realizó y concluyó satisfactoriamente su tesis de licenciatura. Entre las actividades realizadas se encuentran, investigación de materiales usados como TBC en álabes, investigación de espesores de TBC, y cálculos numéricos.



Ciudad de México, 29 de octubre de 2021  
Oficio Núm. 511/2021.-3454-2a

Referencia: DFI-4803-21

Asunto: Finalización académica para  
la incorporación de Nuevos PTC

**MTRO. JUAN IGNACIO CAMARGO NASSAR**  
RECTOR  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ  
PRESENTE

Con un cordial saludo y en atención a los oficios DGPD/111, DGPD/319-02-2021, DGPD/320-02-2021 y DGPD/321-02-2021, remitido por la Mtra. María Esther Mears Delgado, Representante Institucional PRODEP de la universidad a su digno cargo, relacionado con la entrega de los informes finales de los apoyos otorgados en el marco de la convocatoria de Apoyo a la incorporación de Nuevos PTC del ejercicio fiscal 2018, presentados por los profesores enlistados a continuación:

No.	Nombre	Folio
1	BERNADAC VILLEGAS LUIS GERARDO	UACJ-PTC-385
2	CARRILLO PEREYRA FRANCISCO	UACJ-PTC-387
3	CERVANTES ARREOLA DIANA IRASEMA	UACJ-PTC-389
4	CLAUDIO CATALÁN MIGUEL ÁNGEL	UACJ-PTC-391
5	CLEMENTE MIRAFUENTES CHRISTIAN MARISOL	UACJ-PTC-392
6	CÓRDOVA ORTEGA DANIELA GUADALUPE	UACJ-PTC-393
7	DÁVALOS RAMÍREZ JOSÉ OMAR	UACJ-PTC-394
8	DOMÍNGUEZ GUERRERO JOSUÉ	UACJ-PTC-396
9	GARZA HERNÁNDEZ JAVIER ALFONSO	UACJ-PTC-399
10	GONZÁLEZ MACÍAS CARLOS JESÚS	UACJ-PTC-400
11	GÜERECÁ ARVIZUO JAIME	UACJ-PTC-401
12	HERNÁNDEZ PEÑA CLAUDIA CAROLINA	UACJ-PTC-402
13	HOLGUÍN ÁVILA RAÚL	UACJ-PTC-403
14	LINARES GIL MAYRA VERÓNICA	UACJ-PTC-405
15	MANDUJANO SALAZAR YUNUEN YSELA	UACJ-PTC-406
16	MARIACA BELTRÁN YAHIR DE JESÚS	UACJ-PTC-407
17	MÉNDEZ GURROLA IRIS IDDALY	UACJ-PTC-409
18	MOLOTLA XOLALPA PEDRO TLATOANI	UACJ-PTC-410
19	OROZCO LUCERO ERNESTO	UACJ-PTC-412
20	ORTEGA ESTRADA GABRIELA	UACJ-PTC-413
21	RAMÍREZ GÓMEZ ANA ELIZABETH	UACJ-PTC-417
22	REYNOSO JARDÓN ELVA LILIA	UACJ-PTC-418
23	RUBÍ JUÁREZ HUMBERTO	UACJ-PTC-419
24	SALINAS ÁVILA ADRIANA	UACJ-PTC-422
25	TENANGO PIRIN OSCAR	UACJ-PTC-426
26	VÁZQUEZ MARTÍNEZ ALEJANDRO ERNESTO	UACJ-PTC-428

"Este programa es público, ajeno a cualquier partido político. Queda prohibido el uso para fines distintos a los establecidos en el programa."

Av. Universidad No. 1200, Piso 5, Sector 28, Col. Xoco, C.P. 03330, CDMX.

Tel: +52 (55)3601 3331 y 3332 dgesui.ses.sep.gov.mx





Oficio Núm. 511/2021.-3454-2a

Comunico a usted que una vez analizados los informes y la evidencia de las actividades y productos obtenidos por cada profesor, la institución ha cumplido satisfactoriamente con lo establecido en el lineamiento 3.5. Derechos, obligaciones y causas de incumplimiento, suspensión, cancelación o reintegro de los recursos y numeral 5 del lineamiento 3.6.1. Instancia(s) ejecutora(s), tipo Superior de las Reglas de Operación 2018, del Programa Presupuestario S247 Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP); por lo que la Dirección General de Educación Superior Universitaria e Intercultural (DGESUI) a través de esta Dirección de Fortalecimiento Institucional (DFI), da por finiquitado el seguimiento académico establecido por el (los) beneficiario(s); sin embargo, para dar por concluido los compromisos establecidos en el Convenio Marco de Apoyo y colaboración, la institución deberá finiquitar lo correspondiente al seguimiento financiero, por lo que mucho he de agradecerle, comunicarse con la Mtra. María del Rocío Chávez Mayo o con la Lic. Lorena Rosas Baruch al número 553600 2511, extensiones 65612 y 65928 o a los correos electrónicos: [rocioc@nube.sep.gob.mx](mailto:rocioc@nube.sep.gob.mx) y [lorena.rosas@nube.sep.gob.mx](mailto:lorena.rosas@nube.sep.gob.mx).

Sin otro particular, reciba mis más cordiales saludos.

Atentamente

Dr. Isaías Elizarraraz Alcaraz  
Director

DIRECCIÓN GENERAL DE  
EDUCACIÓN SUPERIOR  
UNIVERSITARIA E INTERCULTURAL

C.c.p.- Dr. Francisco Luciano Concheiro Bórquez, Subsecretario de Educación Superior, SES.- Para su conocimiento. ☒  
Dra. Carmen E. Rodríguez Armenta, Directora General, DGESUI.- Para su conocimiento. ☒

*"Este programa es público, ajeno a cualquier partido político. Queda prohibido el uso para fines distintos a los establecidos en el programa."*

Av. Universidad No. 1200, Piso 5, Sector 28, Col. Xoco, C.P. 03330, CDMX.  
Tel: +52 (55)3601 3331 y 3332 [dgesui.ses.sep.gob.mx](mailto:dgesui.ses.sep.gob.mx)

