

ISSN 2410-3950

Volumen 6, Número 21 — Octubre — Diciembre - 2019

# Revista de Sistemas Experimentales



## **ECORFAN-Bolivia**

### **Editor en Jefe**

BARRERO-ROSALES, José Luis. PhD

### **Directora Ejecutiva**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

### **Director Editorial**

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

### **Diseñador Web**

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

### **Diagramador Web**

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

### **Asistente Editorial**

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

### **Traductor**

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

### **Filóloga**

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

**Revista de Sistemas Experimentales**, Volumen 6, Número 21, de Octubre a Diciembre - 2019, es una revista editada trimestralmente por ECORFAN-Bolivia. Loa 1179, Cd. Sucre. Chuquisaca, Bolivia. WEB: [www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org), [revista@ecorfan.org](mailto:revista@ecorfan.org). Editor en Jefe: BARRERO-ROSALES, José Luis. PhD ISSN-2410-3950. Responsables de la última actualización de este número de la Unidad de Informática ECORFAN. ESCAMILLA-BOUCHÁN, Imelda. PhD, LUNA-SOTO, Vladimir. PhD, actualizado al 31 de Diciembre del 2019.

Las opiniones expresadas por los autores no reflejan necesariamente las opiniones del editor de la publicación.

Queda terminantemente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin permiso del Instituto Nacional del Derecho de Autor

# **Revista de Sistemas Experimentales**

## **Definición del Research Journal**

### **Objetivos Científicos**

Apoyar a la Comunidad Científica Internacional en su producción escrita de Ciencia, Tecnología en Innovación en el Área de Biología y Química, en las Subdisciplinas de química analítica, química farmacéutica, química física, química inorgánica, química, macromolecular, química nuclear, física de fluidos, física, estadística, física molecular, física teórica.

ECORFAN-México S.C es una Empresa Científica y Tecnológica en aporte a la formación del Recurso Humano enfocado a la continuidad en el análisis crítico de Investigación Internacional y está adscrita al RENIECYT de CONACYT con número 1702902, su compromiso es difundir las investigaciones y aportaciones de la Comunidad Científica Internacional, de instituciones académicas, organismos y entidades de los sectores público y privado y contribuir a la vinculación de los investigadores que realizan actividades científicas, desarrollos tecnológicos y de formación de recursos humanos especializados con los gobiernos, empresas y organizaciones sociales.

Alentar la interlocución de la Comunidad Científica Internacional con otros centros de estudio de México y del exterior y promover una amplia incorporación de académicos, especialistas e investigadores a la publicación Seriada en Nichos de Ciencia de Universidades Autónomas - Universidades Públicas Estatales - IES Federales - Universidades Politécnicas - Universidades Tecnológicas - Institutos Tecnológicos Federales - Escuelas Normales - Institutos Tecnológicos Descentralizados - Universidades Interculturales - Consejos de CyT - Centros de Investigación CONACYT.

### **Alcances, Cobertura y Audiencia**

Revista de Sistemas Experimentales es un Research Journal editado por ECORFAN-México S.C en su Holding con repositorio en Bolivia, es una publicación científica arbitrada e indizada con periodicidad trimestral. Admite una amplia gama de contenidos que son evaluados por pares académicos por el método de Doble-Ciego, en torno a temas relacionados con la teoría y práctica de química analítica, química farmacéutica, química física, química inorgánica, química, macromolecular, química nuclear, física de fluidos, física, estadística, física molecular, física teórica con enfoques y perspectivas diversos, que contribuyan a la difusión del desarrollo de la Ciencia la Tecnología e Innovación que permitan las argumentaciones relacionadas con la toma de decisiones e incidir en la formulación de las políticas internacionales en el Campo de las Biología y Química. El horizonte editorial de ECORFAN-México® se extiende más allá de la academia e integra otros segmentos de investigación y análisis ajenos a ese ámbito, siempre y cuando cumplan con los requisitos de rigor argumentativo y científico, además de abordar temas de interés general y actual de la Sociedad Científica Internacional.

## **Consejo Editorial**

CARVAJAL - MILLAN, Elizabeth. PhD  
École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

CÓRDOVA - GUERRERO, Iván. PhD  
Universidad de la Laguna

ARMADO - MATUTE, Arnaldo José. PhD  
Universidad de los Andes

RIVERA - BECERRIL, Facundo. PhD  
Institut National de la Recherche Agronomique

CRUZ - REYES, Juan. PhD  
Instituto de Catálisis y Petroleoquímica

LOPEZ - ZAMORA, Leticia. PhD  
Universidad Politécnica de Valencia

STILIANOVA - STOYTCHEVA, Margarita. PhD  
Universidad de Tecnología Química y Metalurgia de Sofia

CORNEJO - BRAVO, José Manuel. PhD  
University of California

SOTERO - SOLIS, Victor Erasmo. PhD  
Universidade de São Paulo

OROPEZA - GUZMÁN, Mercedes Teresita. PhD  
National Polytechnique de Toulouse

## **Comité Arbitral**

ALVARADO - FLORES, Jesús. PhD  
Universidad Autónoma de Aguascalientes

DE LEON - FLORES, Anele. PhD  
Universidad Nacional Autónoma de México

MARTÍNEZ - QUIROZ, Marisela. PhD  
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica

MAGANA - BADILLA, Héctor Alfonso. PhD  
Universidad Autónoma de Baja California

VALDEZ - CASTRO, Ricardo. PhD  
Universidad Nacional Autónoma de México

QUIROZ - CASTILLO, Jesús Manuel. PhD  
Universidad de Sonora

SANTACRUZ - ORTEGA, Hisila del Carmen. PhD  
Instituto Tecnológico de Tijuana

MENDOZA - CASTILLO, Didilia Ileana. PhD  
Instituto Tecnológico de Aguascalientes

OCHOA - TERÁN, Adrián. PhD  
Tecnológico Nacional de México

FRONTANA - VAZQUEZ, Carlos Eduardo. PhD  
Universidad Autónoma Metropolitana

SALDARRIAGA, Hugo. PhD  
Universidad Autónoma del Estado de México

## **Cesión de Derechos**

El envío de un Artículo a Revista de Sistemas Experimentales emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo.

Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Bolivia considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra.

## **Declaración de Autoría**

Indicar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en la participación del Artículo y señalar en extenso la Afiliación Institucional indicando la Dependencia.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo con el Número de CVU Becario-PNPC o SNI-CONACYT- Indicando el Nivel de Investigador y su Perfil de Google Scholar para verificar su nivel de Citación e índice H.

Identificar el Nombre de 1 Autor y 3 Coautores como máximo en los Perfiles de Ciencia y Tecnología ampliamente aceptados por la Comunidad Científica Internacional ORC ID - Researcher ID Thomson - arXiv Author ID - PubMed Author ID - Open ID respectivamente

Indicar el contacto para correspondencia al Autor (Correo y Teléfono) e indicar al Investigador que contribuye como primer Autor del Artículo.

## **Detección de Plagio**

Todos los Artículos serán testeados por el software de plagio PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se mandara a arbitraje y se rescindirá de la recepción del Artículo notificando a los Autores responsables, reivindicando que el plagio académico está tipificado como delito en el Código Penal.

## **Proceso de Arbitraje**

Todos los Artículos se evaluarán por pares académicos por el método de Doble Ciego, el arbitraje Aprobatorio es un requisito para que el Consejo Editorial tome una decisión final que será inapelable en todos los casos. MARVID® es una Marca de derivada de ECORFAN® especializada en proveer a los expertos evaluadores todos ellos con grado de Doctorado y distinción de Investigadores Internacionales en los respectivos Consejos de Ciencia y Tecnología el homólogo de CONACYT para los capítulos de America-Europa-Asia-Africa y Oceanía. La identificación de la autoría deberá aparecer únicamente en una primera página eliminable, con el objeto de asegurar que el proceso de Arbitraje sea anónimo y cubra las siguientes etapas: Identificación del Research Journal con su tasa de ocupamiento autoral - Identificación del Autores y Coautores- Detección de Plagio PLAGSCAN - Revisión de Formatos de Autorización y Originalidad-Asignación al Consejo Editorial- Asignación del par de Árbitros Expertos-Notificación de Dictamen-Declaratoria de Observaciones al Autor-Cotejo de Artículo Modificado para Edición-Publicación.

## **Instrucciones para Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación**

### **Área del Conocimiento**

Los trabajos deberán ser inéditos y referirse a temas de Métodos lógicos, métodos de investigación, método hipotético-deductivo, método de la observación científica, método de la medición, experimentación científica, climatología geología, geoquímica, acústica y a otros temas vinculados a las Biología y Química.

## Presentación del Contenido

Como primer artículo presentamos, *Análisis energético de un sistema termoeléctrico para el aprovechamiento del calor residual en un motor Turbofan mediante dinámica de fluidos computacional*, por ROJAS-AVILA, Apolo, VALLE-HERNÁNDEZ, Julio, CASTILLO-JIMÉNEZ, Víctor, GALLARDO-VILLAREAL, José Manuel y ALONSO-ALFARO Jorge G., con adscripción en la Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo y la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Apan, como segundo artículo presentamos, *Control Robusto  $\mathcal{H}_\infty$  en forma Global para Robot Manipulador*, por CHÁVEZ-GUZMÁN, Carlos, ESQUEDA-ELIZONDO, José, MERIDA-RUBIO, Jovan y COLORES-VARGAS, Juan Miguel, con adscripción en la Universidad Autónoma de Baja California, como tercer artículo presentamos, *Comparaciones ópticas y estructurales de las películas de Óxido de Silicio rico en Silicio (SRO) depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD*, por MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia, LUNA-LÓPEZ, José Alberto, LUNA-FLORES, Adán y HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David, con adscripción en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, como último artículo presentamos, *Deshidratador solar híbrido para el secado de plátano*, por CAMACHO-MARTINEZ, Humberto Armando, ANTONIO-GORDILLO, Diana Montserrat, ROBLES-OCAMPO, José Billerman y SEVILLA-CAMACHO, Perla Jazmín, con adscripción en la Universidad Politécnica de Chiapas.

## Contenido

Artículo	Página
<b>Análisis energético de un sistema termoeléctrico para el aprovechamiento del calor residual en un motor Turbofan mediante dinámica de fluidos computacional</b> ROJAS-AVILA, Apolo, VALLE-HERNÁNDEZ, Julio, CASTILLO-JIMÉNEZ, Víctor, GALLARDO-VILLAREAL, José Manuel y ALONSO-ALFARO Jorge G. <i>Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo</i> <i>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Apan</i>	1-7
<b>Control Robusto <math>\mathcal{H}_\infty</math> en forma Global para Robot Manipulador</b> CHÁVEZ-GUZMÁN, Carlos, ESQUEDA-ELIZONDO, José, MERIDA-RUBIO, Jovan y COLORES-VARGAS, Juan Miguel <i>Universidad Autónoma de Baja California</i>	8-18
<b>Comparaciones ópticas y estructurales de las películas de Óxido de Silicio rico en Silicio (SRO) depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD</b> MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia, LUNA-LÓPEZ, José Alberto, LUNA-FLORES, Adán y HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David <i>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla</i>	19-25
<b>Deshidratador solar híbrido para el secado de plátano</b> CAMACHO-MARTINEZ, Humberto Armando, ANTONIO-GORDILLO, Diana Montserrat, ROBLES-OCAMPO, José Billerman y SEVILLA-CAMACHO, Perla Jazmín <i>Universidad Politécnica de Chiapas</i>	26-33



## Análisis energético de un sistema termoelectrico para el aprovechamiento del calor residual en un motor Turbofan mediante dinámica de fluidos computacional

### Energy Analysis of a thermoelectric system for the use of residual heat in a Turbofan engine through computational fluid dynamics

ROJAS-AVILA, Apolo†, VALLE-HERNÁNDEZ, Julio\*, CASTILLO-JIMÉNEZ, Víctor, GALLARDO-VILLAREAL, José Manuel y ALONSO-ALFARO Jorge G.

*Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Maestría en Ingeniería Aeroespacial  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Apan*

ID 1<sup>er</sup> Autor: Apolo, ROJAS-AVILA / ORC ID: 0000-0003-2934-2533, Researcher ID Thomson: O-4655-2018, CVU CONACYT ID: 905177

ID 1<sup>er</sup> Coautor: Julio, Valle-Hernández / ORC ID: 0000-0001-8957-0066, Researcher ID Thomson: O-7339-2018, CVU CONACYT ID: 210743

ID 2<sup>do</sup> Coautor: Víctor, Castillo-Jiménez / ORC ID: 0000-0002-5031-0635

ID 3<sup>er</sup> Coautor: José Manuel, Gallardo-Villareal / ORC ID: 0000-0002-7578-7229, CVU CONACYT ID: 366394

ID 4<sup>to</sup> Coautor: Jorge G., Alonso-Alfaro

DOI: 10.35429/JOES.2019.21.6.1.7

Recibido 9 de Octubre, 2019; Aceptado 30 de Diciembre, 2019

#### Resumen

En el presente trabajo se muestra el análisis energético de un sistema termoelectrico acoplado a un motor turbofan, el cual se basa en el modelado matemático de la transferencia de calor del sistema durante el proceso de cogeneración utilizando dinámica de fluidos computacionales (CFD). El aprovechamiento del calor residual de un motor turbofan nos permitiría incrementar su eficiencia lo cual tiene impacto tanto económico (debido al ahorro de combustible) como ambiental (reducción de gases contaminantes). La sección propuesta para la instalación del sistema termoelectrico es la que recubre la turbina y la sección de tobera del motor turbofan, ya que son secciones en las que se tienen mejores temperaturas de operación, del orden de 600 a 200 °C. Como resultados de la simulación en CFD se obtiene la distribución de temperaturas a través del termoelectrico y la diferencia de potencial eléctrico generado. Con estos resultados se determina la eficiencia global del sistema y la energía eléctrica generada con el calor residual. La energía generada por el sistema termoelectrico puede ser aprovechada en sistemas secundarios de la aeronave, como el sistema de iluminación, entretenimiento, etc. La importancia del análisis radica en aumentar la eficiencia general del proceso de combustión del motor, para reducir el consumo de combustible y los costos asociados a éste.

Generador termoelectrico, calor residual, Simulación CFD

#### Abstract

This paper shows the energy analysis of a thermoelectric system coupled to a turbofan engine, which is based on the mathematical modeling of the heat transfer of the system during the cogeneration process using fluid dynamics (CFD). The use of waste heat from a turbofan engine would allow us to increase its efficiency which has both economic (due to fuel savings) and environmental (reduction of polluting gases). The proposed section for the installation of the thermoelectric system is the one that covers the turbine and the nozzle section of the turbofan engine, since they are sections in which there are better operating temperatures, in the order of 600 to 200°C. As results of the CFD simulation you get the distribution of temperatures through the thermoelectric and the difference of electrical potential generated. These results determine the overall efficiency of the system and the electrical energy generated by the waste heat. The energy generated by the thermoelectric system can be used in secondary aircraft systems, such as the lighting system, entertainment, etc. The importance of the analysis lies in increasing the overall efficiency of the engine combustion process, to reduce fuel consumption and the costs associated with it.

Thermoelectric Generator, residual heat, CFD Simulation

**Citación:** ROJAS-AVILA, Apolo, VALLE-HERNÁNDEZ, Julio, CASTILLO-JIMÉNEZ, Víctor, GALLARDO-VILLAREAL, José Manuel y ALONSO-ALFARO Jorge G. Análisis energético de un sistema termoelectrico para el aprovechamiento del calor residual en un motor Turbofan mediante dinámica de fluidos computacional. Revista de Sistemas Experimentales. 2019. 6-21: 1-7

\* Correspondencia del Autor (jvalle@upmh.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Debido al incremento del costo en los combustibles derivados del petróleo, aunado al cambio climático por la contaminación derivada de la combustión de los mismos, nos vemos en la necesidad de hacerlos más eficientes, con la finalidad de reducir el consumo de combustible. Los efectos termoeléctricos fueron descubiertos durante la primera mitad del siglo XIX. El efecto Seebeck, descubierto en 1821 por Thomas Johann Seebeck, explica que, si dos metales diferentes están en contacto y son sometidos a diferentes temperaturas, en sus uniones se obtendrá un potencial eléctrico [1], o a la inversa (efecto Peltier, descubierto en 1834). Existe un tercer efecto llamado Efecto Thomson el cual se define como el intercambio de calor en un material homogéneo sometido a una diferencia de temperaturas entre sus extremos a través del cual se hace circular una corriente eléctrica [2].

Los generadores termoeléctricos (TEGs) pueden utilizarse en motores Diésel y escapes de los vehículos como sistemas de cogeneración; lo cual permite reducir el tamaño del alternador que implica reducir el consumo de combustible[3,4]; la Corporación Marítima de Física Aplicada de Baltimore instaló en 2013 un TEG para producir energía eléctrica del fondo marino aprovechando la diferencia de temperatura entre el agua fría del mar y los fluidos calientes liberados por depósitos geotérmicos; aprovechar el calor del cuerpo para cargar dispositivos móviles [3]; en sondas como la Voyager de la NASA, los generadores termoeléctricos han estado en uso por más de 30 años sin necesidad de mantenimiento; en helicópteros de tobera cónica [5]; así como muchas otras potenciales aplicaciones en el sector aeronáutico y aeroespacial [6,7,8].

Los TEGs son útiles en aplicaciones de cogeneración, por ello en el presente trabajo se propone la implementación de un sistema termoeléctrico, en secciones específicas de un motor turbofan, con la finalidad de aprovechar parte del calor residual, del motor, para la generación de energía eléctrica.

Las altas temperaturas generadas en secciones del motor turbofan, como la tobera y secciones que recubren las turbinas, pueden ser aprovechadas para la generación de energía eléctrica con un sistema termoeléctrico.

El flujo secundario permite obtener un mayor gradiente de temperaturas en los TEG, debido a la convección forzada, por lo que la sección con mayor potencial para su implementación es la superficie externa de la tobera y la sección que recubre las turbinas. Es importante que se tenga el mayor gradiente de temperaturas en las caras del termoeléctrico debido a que es directamente proporcional al potencial eléctrico generado.

En el presente trabajo se realiza el análisis del aprovechamiento del calor residual para la generación de energía eléctrica, a partir del calor residual de un motor turbofan, así como su implementación en sistemas de una aeronave. Esto permite disminuir el consumo de combustible ya que la energía eléctrica consumida por la aeronave proviene de sangrados del motor de propulsión o del sistema APU, que en la mayoría de los casos utiliza el mismo tipo de combustible que los motores propulsores. Al reducir el consumo de combustible se reducen los costos relacionados, además de reducir las emisiones contaminantes.

Entre las potenciales aplicaciones, de TEGs, en el sector aeronáutico y aeroespacial se encuentra el aprovechamiento del calor residual, por lo que en este trabajo se presenta una alternativa para la generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento del calor de los gases de escape de los motores de la aeronave.

## Metodología

Para el presente trabajo se llevó a cabo la siguiente metodología:

1. Elección del motor turbofan para su análisis termodinámico.
2. Selección de la sección del motor en la que se instalaran los generadores termoeléctricos.
3. Modelado de la transferencia de calor de la sección del motor turbofan acoplado al generador termoeléctrico.
4. Estimación de la energía térmica aprovechable por el sistema termoeléctrico.
5. Cálculo de la energía eléctrica generada por el sistema termoeléctrico.
6. Determinar los sistemas de la aeronave en los cuales puede ser aprovechada la energía generada.

## 7. Resultados y discusión.

**Características del motor turbofan**

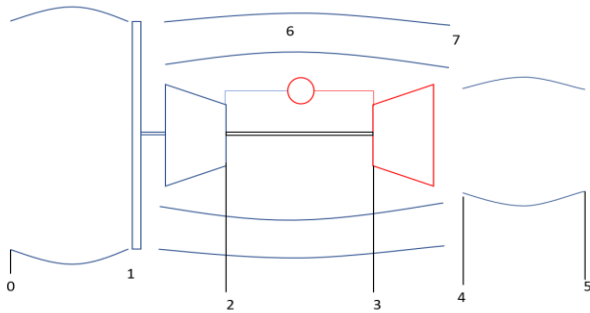
A partir de los datos del motor Trent 900, que se muestran en la tabla 1, se determinaron las condiciones de operación en cada punto del ciclo de propulsión para el motor Trent 900.

Longitud	4.93 m
Diámetro del fan	2.94 m
Bypass Ratio	8.4
Mac de vuelo	0.83
Relación general de presión	39
Compresor intermedio	8 etapas
Compresor de alta	6 etapas
Turbina de alta presión	1 etapa
Turbina de baja presión	5 etapas
Empuje	70,000-72,000 lbf
Temperatura máxima ( $T_{max}$ )	1800 K
Altura de referencia (vuelo crucero)	11,000 m
Velocidad de crucero	900 km/h

**Tabla 1** Datos del motor Trent 900 de Rolls Royce

Fuente: [www.rolls-royce.com](http://www.rolls-royce.com)

La figura 1 muestra el diagrama general de un motor turbofan.



**Figura 1** Diagrama de un motor turbofan

Cada uno de los puntos en la figura nos representa las entradas o salidas de flujos, Identificados de la siguiente manera:

- 0.- Entrada de aire al difusor.
- 1.- Entrada de aire al compresor, pasando por el fan.
- 2.- Salida de aire del compresor y entrada a la cámara de combustión.
- 3.- Salida de gases de la cámara de combustión y entrada a la sección de turbinas.
- 4.- Salida de gases de combustión de las turbinas y entrada a la tobera.
- 5.- Salida de gases de combustión de la tobera.
- 6.- Flujo de aire del flujo secundario.
- 7.- Salida de aire del flujo secundario.

**Simulación CFD de la sección de interés del motor turbofan**

A partir de la temperatura máxima y los flujos, primario y secundario, se realiza una simulación CFD de la sección de interés para determinar la distribución de temperaturas. Las secciones elegidas, para la colocación del sistema termoelectrico, son la sección que recubre la turbina y la sección de la tobera, debido a que ahí se encuentran temperaturas adecuadas, además de no tener contacto con los gases de escape de la cámara de combustión, y son refrigeradas por el flujo secundario del motor.

En estas secciones se tiene un área disponible de alrededor de 8 m<sup>2</sup> para la colocación de termoelectricos, así como temperaturas que van desde los 200 hasta los 600 °C. Para la elaboración del modelo se tomó como temperatura de flujo primario, a la entrada de la cámara de combustión, una temperatura de alrededor de 620 K. A partir de la distribución de temperaturas obtenida se realiza el modelado del sistema termoelectrico, para determinar el potencial eléctrico generado a partir de la diferencia de temperaturas.

**Modelado del sistema termoelectrico**

En el efecto Seebeck el voltaje producido es proporcional a la diferencia de temperaturas entre las uniones. Esto se relaciona mediante la constante de proporcionalidad ( $s$ ) llamada coeficiente de Seebeck. Para el análisis del sistema termoelectrico se parte del balance de energía, como se muestra en la ecuación 1, para la sección a analizar.

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} - S_{cal} = 0 \quad (1)$$

Donde:

$Q_{in}$ : Calor suministrado en el área de contacto con el termoelectrico, calor residual del motor.

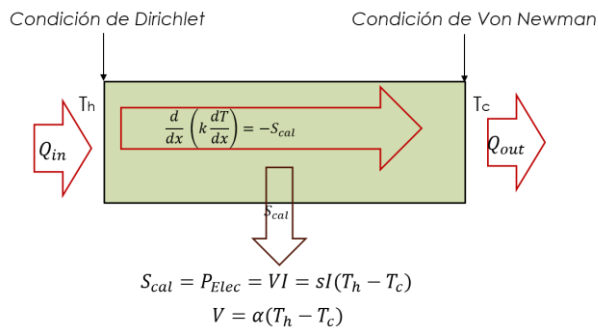
$Q_{out}$ : Calor que se emite al ambiente que rodea al termoelectrico (convección radiación).

$S_{cal}$ : Sumidero de calor, el cual representa la energía eléctrica generada por el termoelectrico.

Para determinar la diferencia de potencial eléctrico generado por el sistema termoelectrico se considera que la variación del coeficiente de Seebeck es muy poca, de tal manera que se puede considerar constante, esto es:

$$V_{\alpha} = s(T_h - T_c) \quad (2)$$

La transferencia de calor en el termoelectrico parte de la temperatura en la cara caliente ( $T_h$ ) del semiconductor y del flujo de calor en la cara fría ( $T_c$ ), como se muestra en la figura 2. El flujo de calor, en  $T_c$ , está en función de la transferencia de calor por convección forzada debido al flujo secundario del motor.



**Figura 2** Transferencia de calor en un segmento termoelectrico de los que se compone cada módulo termoelectrico

Para el cálculo de la potencia eléctrica máxima generada por el sistema termoelectrico se utiliza la ecuación 3.

$$P_{El} = I^2 * R_T * n \quad (3)$$

Donde:

$P_{El}$ : Potencia eléctrica

$I$ : Corriente eléctrica

$R_T$ : Resistencia eléctrica en el módulo

$n$ : número de segmentos semiconductores

El cálculo de la corriente eléctrica se determina para los parámetros máximos como el voltaje de Seebeck entre dos veces la resistencia eléctrica del material semiconductor. En el anexo 2 se muestran los valores del material semiconductor.

Para realizar un balance de energía, sobre un elemento termoelectrico, se parte de la ecuación general de conducción de calor. Considerando que el estudio se realiza en estado estacionario, con conductividad y área de transferencia de calor constante, la ecuación de conducción de calor queda como:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) - \frac{\dot{S}_{cal}}{k} = 0 \quad (4)$$

Donde  $S_{cal}$  se considera el sumidero de calor equivalente a la energía eléctrica generada por el efecto termoelectrico.

Una vez determinada la potencia generada por parte del sistema termoelectrico, se realiza el análisis energético para determinar la viabilidad energética de la implementación del sistema, y obtener la eficiencia de cogeneración.

A partir de la ecuación 4 se realiza la discretización para la transferencia de calor de la condición de Dirichlet a la de Von Newman, obteniendo las ecuaciones 5, para la transferencia de calor en la condición de frontera donde se conoce la temperatura y a través del segmento termoelectrico, y 6 para la temperatura en la condición de Dirichlet ya que se conoce el flujo de calor en función a la convección forzada que se genera en el borde.

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (5)$$

Donde:

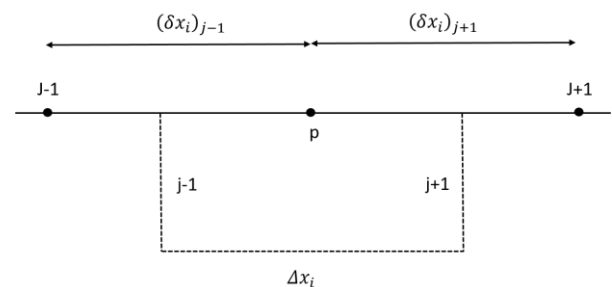
$$a_E = \frac{k_{j+1}}{(\delta x_i)_{j+1}}$$

$$a_W = \frac{k_{j-1}}{(\delta x_i)_{j-1}}$$

$$a_p = a_E + a_W$$

$$b = \dot{S}_{cal} \Delta x_i$$

En la figura 3 se puede observar los incrementos mostrados en la ecuación 5, para la discretización de la transferencia de calor en un segmento termoelectrico.



**Figura 3** Discretización de cada punto de la malla para un segmento termoelectrico

$$a_{j-1} T_{j-1} = a_j T_j + b \quad (6)$$

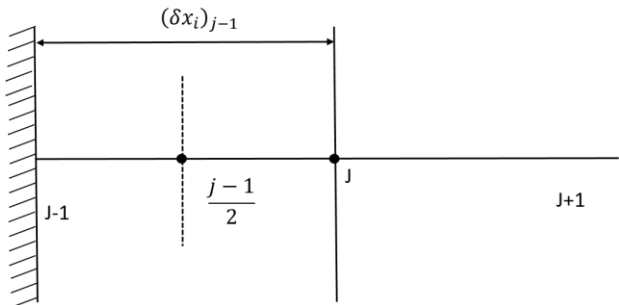
Donde:

$$a_j = \frac{k_{j-1}}{(\delta x)_{j-1}^2}$$

$$b = S_0 \Delta x + q_{j-1}$$

$$a_{j-1} = a_j - S_1 \Delta x$$

En el borde en el cual se conoce el flujo de calor (ecuación 6) se discretiza tomando en cuenta los incrementos mostrados en la figura 4.



**Figura 4** Incrementos para la discretización en el borde con condición de Dirichlet

**Resultados del modelo**

Los resultados obtenidos se dividen en:

- A.-Parámetros de operación del motor turbofan.
- B.-Distribución de temperaturas de la sección de interés del motor.
- C.- Gradiente de temperaturas y potencial eléctrico en un TEG.
- D.- Potencia eléctrica máxima obtenida por cada TEG.

A. Parámetros de operación del motor turbofan.

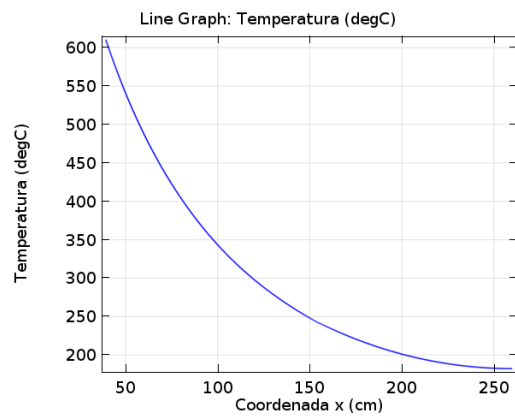
Mediante las características conocidas el motor Trent 900 se realizó el análisis termodinámico en condiciones de vuelo de crucero para determinar la temperatura de estancamiento ( $T_T$ ), presión de estancamiento ( $P_T$ ), la temperatura estática y el trabajo realizado ( $W$ ).

Punto	$T_T$ [K]	$P_T$ [Kpa]	T [K]	w [KJ/Kg]
0	250.3116	36.05	220	0
1	250.3116	35.019	220	0
2	776.03	1364.922	621.99	-432
3	1800	1337.62	1800	-528
4	987.545	119.0062	670	960
5	987.545	-----	670	0
6	301.487	64.654	222.45	0
7	301.487	-----	222.45	0

**Tabla 2** condiciones de temperatura, presión, calor y trabajo en cada punto del ciclo de propulsión del motor Trent 900

B. Distribución de temperaturas de la sección de interés del motor

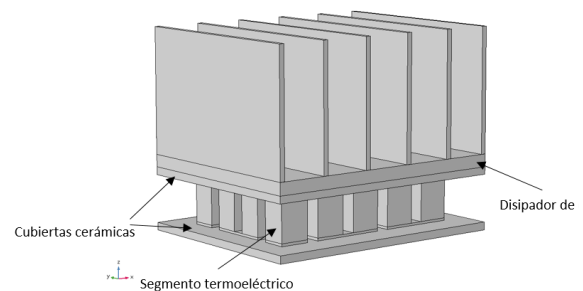
A partir del modelo CFD realizado con las características y parámetros determinados del motor turbofan (Tabla 2) se obtuvo como resultado la distribución de temperaturas en la sección de interés (Gráfico 1). La distribución de temperatura obtenida se utiliza como la temperatura de la cara caliente en el segmento termoelectrico descrito en la sección anterior (modelado del sistema termoelectrico) como condición de Dirichlet.



**Gráfico 1** Distribución de temperatura en la cara externa de la sección que recubre la turbina y en la tobera

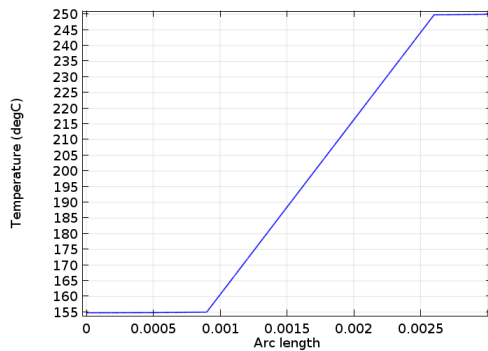
C. Gradiente de temperaturas y potencial eléctrico en un TEG

Mediante la distribución de temperatura se realizó un modelo del comportamiento de un módulo termoelectrico bajo condiciones de temperatura en el rango de la gráfica 1, obteniendo como resultado diferencias de temperatura de alrededor de 100 °C y potenciales eléctricos de 0.022 V por cada segmento termoelectrico. En la figura 5 se ilustra el segmento termoelectrico en el TEG modelado en CFD, el cual tiene una dimensión de 1x0.8 cm.



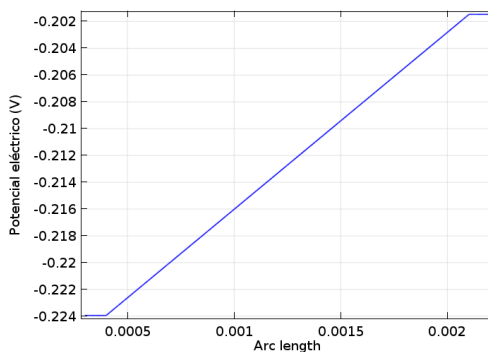
**Figura 5** Modulo termoelectrico con disipador de calor

En el gráfico 2 se muestra la distribución de temperaturas a través de las caras de un elemento termoelectrico.



**Gráfico 2** Distribución de temperaturas en cada segmento termoelectrico

El potencial eléctrico generado se debe a la diferencia de temperaturas en cada segmento termoelectrico. El gráfico 3 muestra la generación de potencial eléctrico en un segmento que compone al módulo.



**Gráfico 3** Potencial eléctrico en un segmento termoelectrico

#### D. Potencia eléctrica generada por cada TEG

A partir de los resultados obtenidos se puede determinar la cantidad de energía generada por cada módulo termoelectrico obteniendo 8.7 W eléctricos por cada 16 cm<sup>2</sup>.

#### Análisis de resultados

Para obtener el gradiente de temperaturas se utiliza un disipador de calor ya que se mejora considerablemente el gradiente de temperaturas, de 40 °C a 100°C.

A partir de los resultados obtenidos se estima la generación de alrededor de 5.4 KW/m<sup>2</sup>.

La energía eléctrica generada puede ser aprovechada en sistemas de la aeronave tales como la iluminación en secciones de pasajeros ya que el consumo de potencia es de alrededor de 5.6 KW.

#### Discusión de resultados

Las potenciales aplicaciones, de la generación de energía termoelectrica, en la aeronave son principalmente en sistemas secundarios de la aeronave tales como entretenimiento, carga de dispositivos móviles, iluminación, etc.

No obstante, que los resultados obtenidos son teóricos, por lo que deberán ser validados en trabajos futuros, los rangos de potencia obtenidos se muestran prometedores para su implementación como sistema de cogeneración.

#### Agradecimiento

Agradecimiento a CONACYT por el apoyo económico a través del programa de becas de posgrado para carreras en PNP.

#### Referencias

- [1] Fraisse, G., Ramousse, J., Sgorlon, D., & Goupil, C. (2013). Comparison of different modeling approaches for thermoelectric elements. *Energy Conversion and Management*, 65, 351–356.
- [2] Chen, J., Yan, Z., & Wu, L. (1996). The influence of Thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of a thermoelectric generator. *Journal of Applied Physics*, 79(11), 8823–8828.
- [3] Navarro, P. M. (2017). Análisis por elementos finitos de los generadores termoelectricos y sus aplicaciones aeroespaciales (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [4] Temizer, I., & Ilkiliç, C. (2016). The performance and analysis of the thermoelectric generator system used in diesel engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 141–151.

[5] Kousksou, T., Bédécarrats, J. P., Champier, D., Pignolet, P., & Brillet, C. (2011). Numerical study of thermoelectric power generation for a helicopter conical nozzle. *Journal of Power Sources*, 196(8), 4026–4032.

[6] Champier, D. (2017). Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*, 140, 167–181.

[7] Janak, L., Ancik, Z., Vetiska, J., & Hadas, Z. (2015). Thermoelectric Generator Based on MEMS Module as an Electric Power Backup in Aerospace Applications. *Materials Today: Proceedings*, 2(2), 865–870.

[8] Samson, D., Kluge, M., Becker, T., & Schmid, U. (2011). Wireless sensor node powered by aircraft specific thermoelectric energy harvesting. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 172(1), 240–244.

[9] Hernández, V.-, Alejandro, O., & Rojas-Avila, R. (2018). Análisis energético de un sistema de generación termoeléctrica utilizando calor residual de celdas de combustible. *Revista de Ingeniería Mecánica*, 2(6), 20–27.

[10] Undurraga Almaraz, A. (2014). Viabilidad de los materiales termoeléctricos (tesis de maestría). Universidad de Barcelona, España.

[11] Y. Niño. (2012) Método de los volúmenes finitos. Universidad de Chile, departamento de ingeniería civil.

## Anexos

### Anexo 1

Características y eficiencias usadas para el cálculo de las propiedades termodinámicas del ciclo de propulsión de un motor Trent 900, tipo turbofan.

$\Pi_{Fan}$	1.5
$\eta_N$	97%
$\eta_D$	99%
$\eta_{ise}$	87%
$\eta_{isf}$	89%
$\eta_{comb}$	98%
$\Delta P_{com}$	2%
K	1.4
$C_p$ (Aire)	1.005 [KJ/Kg*K]
$C_{pg}$ (Gases de escape)	1.147 [KJ/Kg*K]
$K_g$ (Gases de escape)	1.33

### Anexo 2

Propiedades térmicas y eléctricas del telururo de bismuto.

Propiedad	Valor
Coficiente de Seebeck (s)	$200 \frac{\mu V}{K}$
Conductividad térmica (k)	$1.8 \frac{W}{mK}$
Resistividad eléctrica ( $\rho$ )	$1.5 \times 10^{-5} \Omega * m$

## Control Robusto $\mathcal{H}_\infty$ en forma Global para Robot Manipulador

### Global Robust Control $\mathcal{H}_\infty$ for Robot Manipulator

CHÁVEZ-GUZMÁN, Carlos†\*, ESQUEDA-ELIZONDO, José, MERIDA-RUBIO, Jovan y COLORES-VARGAS, Juan Miguel

*Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ingeniería y Negocios*

ID 1<sup>er</sup> Autor: Carlos, Chávez-Guzmán / ORC ID: 0000-0002-2850-3676, CVU CONACYT ID: 94692

ID 1<sup>er</sup> Coautor: José, Esqueda-Elizondo / ORC ID: 0000-0001-8710-8978, Researcher ID Thomson: I-2941-2017, CVU CONACYT ID: 90966

ID 2<sup>do</sup> Coautor: Jovan, Merida-Rubio / ORC ID: 0000-0002-9355-4787, CVU CONACYT ID: 234759

ID 3<sup>er</sup> Coautor: Juan Miguel, Colores-Vargas / ORC ID: 0000-0001-9336-2470, CVU CONACYT ID: 235164

DOI: 10.35429/JOES.2019.21.6.8.18

Recibido: 30 de Agosto, 2019; Aceptado 30 de Diciembre, 2019

#### Resumen

En este artículo se propone una solución al problema de control de movimiento  $\mathcal{H}_\infty$  en forma global, aplicado a robots manipuladores de  $l$  grados de libertad, completamente actuados, con articulaciones de tipo rotacional y sujeto a perturbaciones externas. La metodología empleada fué verificar la desigualdad de Hamilton-Jacobi-Isaacs por medio de una función estricta de Lyapunov y establecer las condiciones suficientes bajo las cuales el punto de equilibrio del sistema en lazo cerrado es asintóticamente estable en forma global mientras que el sistema perturbado tiene una ganancia  $\mathcal{L}_2$  (espacio de Hilbert) menor o igual a una constante predeterminada. En la actualidad una de las desventajas del control  $\mathcal{H}_\infty$ , con respecto a otras técnicas de control, es la linealización del sistema alrededor de un punto de equilibrio, que convierte la desigualdad Hamilton-Jacobi-Isaacs en ecuaciones algebraicas de Riccati, que facilitan la solución del problema de control de movimiento  $\mathcal{H}_\infty$ , sin embargo, el controlador se vuelve local. La aportación es el diseño de un controlador robusto  $\mathcal{H}_\infty$  en forma global para resolver el problema de seguimiento de trayectorias en robots manipuladores. Se valida la teoría en un robot manipulador de  $\ell$  grados de libertad.

**Control robusto, Sistemas no lineales, Robot manipulador**

#### Abstract

In this paper is proposed a solution to the tracking problem with robust  $\mathcal{H}_\infty$  global control, applied to robot manipulator completely actuated with rotational joint in presence of external disturbances. The Hamilton-Jacobi-Isaacs inequality is verified by a strict function of Lyapunov and enough conditions will be found under which the equilibrium point of the closed-loop system is asymptotically stable globally while the disturbed system has a gain  $\mathcal{L}_2$  less than or equal to a predetermined constant. Currently, one of the disadvantages of the  $\mathcal{H}_\infty$  control, with respect to other control techniques, is the linearization of the system around a point of equilibrium, which converts the Hamilton-Jacobi-Isaacs inequality into algebraic of Riccati equations, which facilitate the solution to the motion control problem  $\mathcal{H}_\infty$ , however, the controller becomes local. Now, through a strict function of Lyapunov it was possible to verify that the Hamilton-Jacobi-Isaacs inequality is satisfied globally. The theory is validated in a robot manipulator with  $\ell$  degree of freedom.

**Robust control, Nonlinear systems, Manipulator robots**

**Citación:** CHÁVEZ-GUZMÁN, Carlos, ESQUEDA-ELIZONDO, José, MERIDA-RUBIO, Jovan y COLORES-VARGAS, Juan Miguel. Control Robusto  $\mathcal{H}_\infty$  en forma Global para Robot Manipulador. Revista de Sistemas Experimentales. 2019. 6-21: 8-18

\* Correspondencia del Autor (cchavez@uabc.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.



## Introducción

Desde hace varias décadas los procesos de manufactura han incrementado el uso de robots manipuladores en tareas cada vez más complejas, por consiguiente es imprescindible diseñar sistemas de control más sofisticados que mejoren la precisión y repetitividad en sus movimientos, por lo tanto es necesario minimizar los efectos inherentes a los sistemas mecánicos como el efecto de elasticidad en el acoplamiento mecánico entre el actuador y la articulación, la fricción, el juego angular entre los engranes, zona muerta provocado por el uso de engranajes, reductores *cyclo* y *Harmonic*, bandas dentadas, entre otros. Otros fenómenos que alteran el rendimiento de los sistemas de control son el ruido en las mediciones, las perturbaciones externas y las incertidumbres en el modelo.

Existen en la literatura excelentes trabajos que abordan estos problemas por separado, por ejemplo, en Arimoto (1996), Kelly y Santibañez (2005), Spong, Khorasani y Kokotovic (1987) y Spong y Vidyasagar (1989) donde se reportaron la síntesis de controladores que aseguran estabilidad asintótica en forma global para robots libre de perturbaciones.

En lo que concierne a los controladores robustos aplicados a robots manipuladores que operan bajo condiciones inciertas también se han investigado y reportado las condiciones de estabilidad asintótica en forma global y local en Orlov y Aguilar (2014), Utkin, Guldner y Shi (2009) y Sage, De Mathelin y Ostertag (1999).

Existen diversas metodologías que resuelven exitosamente los mencionados problemas que afectan a los robots, pero cada una trata las no linealidades mencionadas de manera diferente o independiente. Por ejemplo, el control adaptivo se usó para resolver el problema de regulación de posición en presencia de incertidumbre en los parámetros. El control por modos deslizantes en Utkin (1992) se ha usado con éxito cuando existen incertidumbres en los parámetros y para el rechazo a disturbios externos acoplados además de concluir estabilidad en tiempo finito, pero unos de sus inconvenientes es el efecto del *chattering* en la señal de control (Levant, 2010) y Utkin y Lee (2006).

El control  $\mathcal{H}_\infty$  se conoce por atenuar las perturbaciones acopladas y no acopladas, incluyendo el ruido, véase Acho, Orlov y Solis (2001), Ball, Helton y Walker (1993), Helton, James, 1999, Isidori y Astolfi (1992), Orlov y Aguilar (2014), Van der Schaft (1992) y Doyle, Glover y Khargonekar (1989) sin embargo en esas investigaciones se ha resuelto el problema de forma local. Para el caso global se debe resolver la desigualdad de Hamilton-Jacobi-Isaacs que resulta en un problema de dimensiones infinitas Krstić y Deng (1998) y Subbotin (1995).

La estabilidad asintótica en forma global del punto de equilibrio para el problema de regulación de posición en un robot manipulador con compensación de fuerza gravitacional se ha demostrado en Kelly y Santibañez (2005) y Chung, Fu y Hsu (2008) y para ese mismo problema usando compensación de fuerza gravitacional con el control  $\mathcal{H}_\infty$  local se demostró en Orlov y Aguilar (2004). En Osuna, Montaña y Orlov (2015) extendieron el análisis de la ganancia  $\mathcal{L}_2$  a sistemas mecánicos híbridos al resolver la desigualdad parcial de Hamilton-Jacobi en presencia de modos deslizantes y restricciones unilaterales y establecer las condiciones de estabilidad asintótica en forma global y garantizar que la ganancia  $\mathcal{L}_2$  es menor que el nivel de atenuación del disturbio aplicado.

Respecto a los sistemas no lineales la dificultad de tratar con ecuaciones diferenciales parciales se puede evitar al resolver la ecuación diferencial o algebraica de Riccati para el modelo de la planta lineal para condiciones iniciales que se encuentren en una vecindad del punto de equilibrio lo que implica una solución local al problema del control  $\mathcal{H}_\infty$  no lineal (ver, e.g. Meza, Aguilar y Shiriaev, 2011, Orlov y Aguilar, 2004, Lukes, 1969 y Glad, 1987).

En este sentido el diseño de un regulador basado en un método numérico para solucionar la desigualdad de Hamilton-Jacobi-Isaacs se propone en Aluyi (2003). Otro método numérico propuesto por Ferreira, Rocha y Sales (2008) consiste en reducir la ecuación de Hamilton-Jacobi-Isaacs en una secuencia infinita de ecuaciones diferenciales parciales lineales donde la solución se obtiene al aplicar el método de aproximación de Galerkin.

Soluciones con desigualdades matriciales lineales y no lineales en Boyd, Ghaoui, Feron y Balakrishnan (1994) y técnicas numéricas se han también propuesto para resolver el problema del control  $\mathcal{H}_\infty$  no lineal en Yim y Park (1999). Material adicional respecto a soluciones numéricas al problema del control  $\mathcal{H}_\infty$  no lineal se recomienda leer a Aluyi (2011) y Hardt, Helton y Kreutz (2000).

En este trabajo se propone una solución al problema del control de movimiento  $\mathcal{H}_\infty$  en forma global, aplicado a robots manipuladores completamente actuados con articulaciones de tipo rotacional y sujeto a perturbaciones externas. La hipótesis planteada es demostrar que la desigualdad de Hamilton-Jacobi-Isaacs se cumple por medio de una función estricta de Lyapunov propuesta por Kelly, Santibáñez y Loria (2005), y establecer las condiciones suficientes bajo las cuales el punto de equilibrio del sistema en lazo cerrado es asintóticamente estable en forma global mientras que el sistema perturbado tiene una ganancia  $\mathcal{L}_2$  menor o igual a una constante predeterminada, esto permite diseñar el controlador robusto  $\mathcal{H}_\infty$  en forma global.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se proporciona el marco teórico del control  $\mathcal{H}_\infty$  no lineal para sistemas no lineales y variantes en el tiempo, la sección 3 se formula el problema de control de movimiento  $\mathcal{H}_\infty$  en forma global para robots manipuladores y se proporciona la condición de suficiencia para garantizar unicidad del punto de equilibrio, la sección 4 se proporciona el diseño del control de movimiento en forma global para robots manipuladores, la sección 5 se valida la teoría en un robot manipulador y la sección 6 se proporcionan las conclusiones.

## Fundamentos teóricos

### Teoría del control $\mathcal{H}_\infty$ no lineal

El presente estudio se enfoca en los sistemas no lineales y variantes en el tiempo, modelados por las siguientes ecuaciones (Orlov y Aguilar, 2014):

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(x, t) + g_1(x, t)w(t) + g_2(x, t)u(t) \\ z &= h_1(x, t) + k_{12}(x, t)u(t), \\ y &= h_2(x, t) + k_{21}(x, t)w(t), \end{aligned} \right\} (1)$$

donde  $t \in \mathbb{R}$  es el tiempo,  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de estados del sistema,  $u(t) \in \mathbb{R}^m$  es el vector de entrada de control,  $w(t) \in \mathbb{R}^r$  es el vector de disturbios desconocidos e incertidumbre en el modelo,  $z(t) \in \mathbb{R}^s$  es el vector de la salida desconocida a ser controlada, y  $y(t) \in \mathbb{R}^n$  es el vector de salida disponibles para la medición del sistema. Se asume que el sistema (1) debe satisfacer las siguientes suposiciones:

*Suposición 1* Las funciones vectoriales y matriciales

$f(t, x), g_1(t, x), g_2(t, x), h_1(t, x), h_2(t, x), k_{12}(t, x), k_{21}(t, x)$  se suponen continuas en  $t$ , continuamente diferenciables en  $x$  y de dimensiones apropiadas.

*Suposición 2*  $f(t, 0) = 0, h_1(t, 0) = 0, h_2(t, 0) = 0$  para toda  $t$ .

*Suposición 3*  $h_1^T(t, x)k_{12}(t, x) = 0, k_{12}^T(t, x)k_{12}(t, x) = I, k_{21}(t, x)g_1^T(t, x) = 0, k_{21}(t, x)k_{21}^T(t, x) = I$  se debe satisfacer para toda  $x$  y toda  $t$ .

La *suposición 1* garantiza que las dinámicas del sistema estén bien posicionadas, mientras el sistema es excitado con entradas exógenas. La *Suposición 2* asegura que el origen sea el único punto de equilibrio en ausencia de entradas ( $u(t) = 0$ ) y disturbios ( $w(t) = 0$ ) para el sistema dinámico (1). La *suposición 3* está relacionada con ventajas numéricas consideradas por el problema estándar del control  $\mathcal{H}_\infty$ .

La ley de control por retroalimentación de estados se define de la forma:

$$u(t) = K(t, x), \quad (2)$$

la cual se considera un controlador admisible en forma global por retroalimentación de estados, si el sistema en lazo cerrado (1) y (2) es asintóticamente estable en forma global siempre y cuando  $w = 0$ , y para un valor de  $\gamma > 0$  dado la ganancia  $\mathcal{L}_2$  del sistema en lazo cerrado (1) y (2) es menor que  $\gamma$  si la respuesta de  $z(t)$ , resultante de  $w(t)$  para cualquier estado inicial  $x(t_0) = 0$  se satisface con la siguiente desigualdad:

$$\int_{t_0}^{t_1} \|z(t)\|^2 dt < \gamma^2 \int_{t_0}^{t_1} \|w(t)\|^2 dt, \quad (3)$$

para toda  $t_1 > t_0$  y toda función continua a tramos  $w(t)$ .

### Solución global

A continuación, se presenta la hipótesis bajo la cual se da la solución global al problema de control  $\mathcal{H}_\infty$ .

*Hipótesis 1* (Orlov y Aguilar, 2014). Existe una función definida positiva  $F(x)$  y una función suave definida positiva  $V(t, x)$  tal que la desigualdad de Hamilton-Jacobi-Isaacs (Orlov y Aguilar, 2014):

$$\frac{\partial V(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} f(t, x) + \gamma^2 \alpha_1^T(t, x) \alpha_1(t, x) - \alpha_2^T(t, x) \alpha_2(t, x) + h_1^T(t, x) h_1(t, x) + F(x) \leq 0 \quad (4)$$

Se cumple, con:

$$\alpha_1(t, x) = \frac{1}{2\gamma^2} g_1^T(t, x) \left( \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \right)^T, \quad (5)$$

$$\alpha_2(t, x) = \frac{1}{2} g_2^T(t, x) \left( \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} \right)^T. \quad (6)$$

Con la *hipótesis 1* satisfecha, una solución del problema de control  $\mathcal{H}_\infty$  es postulado como sigue:

*Teorema 1* (Orlov y Aguilar, 2014). Suponer que la *hipótesis 1* se cumple, entonces el problema de control no lineal  $\mathcal{H}_\infty$  para el sistema no lineal (1) se resuelve a través de la ley de control por retroalimentación de estados:

$$u(t) = \alpha_2(t, x), \quad (7)$$

con la *hipótesis 1* y el *teorema 1* declarados se tienen las bases para resolver el problema del control no lineal  $\mathcal{H}_\infty$  para robots manipuladores.

### Modelado dinámico de robots manipuladores

Tomado de Kelly et al., (2005), el modelo dinámico del robot se obtiene por medio de la ecuación de movimiento de Lagrange o ecuación de movimiento de Euler-Lagrange, que se define como sigue:

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q} = \tau(t), \quad (8)$$

donde  $q(t) \in \mathbb{R}^l$  es el vector de posiciones articulares,  $\dot{q}(t) \in \mathbb{R}^l$  es el vector de velocidades articulares,  $\tau(t) \in \mathbb{R}^l$  es el vector de fuerzas y pares aplicados a las articulaciones,  $t \in \mathbb{R}$  es el tiempo, y el Lagrangeano se define como:

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U(q, \dot{q}), \quad (7)$$

donde  $K \in \mathbb{R}^l$  es el vector de energía cinética y  $U \in \mathbb{R}^l$  es el vector de energía potencial.

Al desarrollar las ecuaciones (8) y (9) se obtiene el siguiente modelo matemático compacto (Spong y Vidyasagar, 1989) del robot manipulador con enlaces rígidos y articulaciones rotacionales de  $l$  grados de libertad:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau(t) + w_m(t), \quad (10)$$

donde  $M(q) \in \mathbb{R}^{l \times l}$  es la matriz de inercia,  $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{l \times l}$  es la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis,  $g(q) \in \mathbb{R}^l$  es el vector de pares gravitacionales y  $w_m(t) \in \mathbb{R}^l$  son perturbaciones admisibles acopladas que pertenecen al espacio  $\mathcal{L}_2$ .

Se supone que las posiciones y las velocidades articulares se pueden medir. Las siguientes propiedades, tomadas de Spong y Vidyasagar (1989), son válidas solo para los sistemas mecánicos bajo consideración:

*Propiedad 1* La matriz de inercia  $M(q)$  es simétrica y definida positiva para toda  $q(t)$ . La matriz  $M^{-1}(q)$  existe y es definida positiva para toda  $q(t)$  también.

*Propiedad 2* La matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis  $C(q, \dot{q})$  y la derivada temporal  $\dot{M}(q)$  de la matriz de inercia satisface:

$$\dot{q}^T \left[ \frac{1}{2} \dot{M}(q) - C(q, \dot{q}) \right] \dot{q} = 0, \quad (11)$$

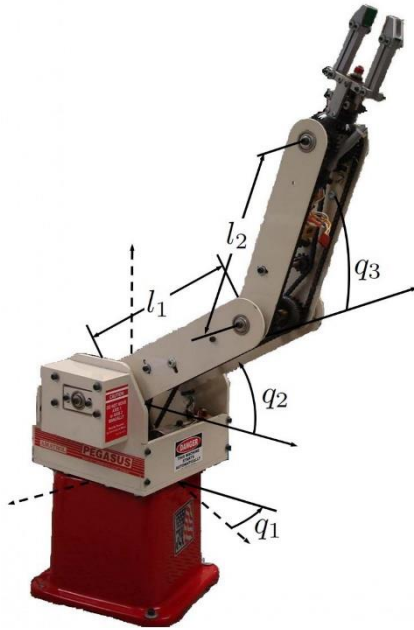
para toda  $q$  y  $\dot{q}$ .

*Propiedad 3* Existe una constante positiva  $K_{c1}$  tal que para toda  $x, y, z \in \mathbb{R}^l$

$$\|C(x, y)z\| \leq K_{c1} \|y\| \|z\|. \quad (12)$$

### Parámetros del robot Pegasus

El modelo dinámico del robot manipulador Pegasus de tres grados de libertad con articulaciones rotacionales y con el sistema de transmisión basado en un tornillo sinfín, una helicoidal y una cadena para las articulaciones  $q_1, q_2, q_3$ , respectivamente y con los actuadores conectados a las transmisiones con motores equipados con su propia transmisión reductora con una resolución de 19.7:1 para  $q_1, q_2$  y 127.8:1 para  $q_3$  (ver figura 1) sus dinámicas son gobernadas por la ecuación (8).



**Figura 1** Robot manipulador de tres grados de libertad  
Fuente: Elaboración Propia

Se definen los parámetros del robot Pegasus:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{11}(q) & 0 & 0 \\ 0 & m_{22}(q) & m_{23}(q) \\ 0 & m_{23}(q) & m_{33}(q) \end{bmatrix},$$

con:

$$\begin{aligned} m_{11}(q) &= m_2 l_1^2 \cos^2(q_2) + 2m_2 l_1 l_2 \cos(q_2) \cos(q_2 + q_3) + m_2 l_2^2 \cos^2(q_2 + q_3) + m_1 l_1^2 \cos^2(q_2) + I_1, \\ m_{22}(q) &= m_1 l_1^2 + m_2 l_1^2 + 2m_2 l_1 l_2 \cos(q_3) + m_2 l_2^2 + I_2 + I_3, \\ m_{23}(q) &= m_2 l_1 l_2 \cos(q_3) + m_2 l_2^2 + I_3, \\ m_{33}(q) &= m_2 l_2^2 + I_3, \end{aligned}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_{11}(q, \dot{q}) & c_{12}(q, \dot{q}) & c_{13}(q, \dot{q}) \\ c_{21}(q, \dot{q}) & c_{22}(q, \dot{q}) & c_{23}(q, \dot{q}) \\ c_{31}(q, \dot{q}) & c_{32}(q, \dot{q}) & 0 \end{bmatrix},$$

con:

$$\begin{aligned} c_{11}(q, \dot{q}) &= -m_2 l_1^2 S_2 C_2 \dot{q}_2 - m_2 l_1 l_2 S_2 C_{23} \dot{q}_2 - m_1 l_1^2 S_2 C_2 \dot{q}_2 - m_2 l_1 l_2 C_2 S_{23} (\dot{q}_2 + \dot{q}_3) - m_2 l_2^2 S_{23} C_{23} (\dot{q}_2 + \dot{q}_3), \\ c_{12}(q, \dot{q}) &= -m_2 l_1^2 S_2 C_2 \dot{q}_1 - m_2 l_1 l_2 S_{23} C_2 \dot{q}_1 - m_2 l_2^2 S_{23} C_{23} \dot{q}_1 - m_2 l_1 l_2 C_{23} S_2 \dot{q}_1 - m_1 l_1^2 S_2 C_2 \dot{q}_1, \\ c_{13}(q, \dot{q}) &= -m_2 l_1 l_2 S_{23} C_2 \dot{q}_1 - m_2 l_2^2 S_{23} C_{23} \dot{q}_1, \\ c_{21}(q, \dot{q}) &= m_2 l_1^2 S_2 C_2 \dot{q}_1 + m_2 l_1 l_2 S_{23} C_2 \dot{q}_1 + m_2 l_1 l_2 S_2 C_{23} \dot{q}_1 + m_2 l_2^2 S_{23} C_{23} \dot{q}_1, \\ c_{22}(q, \dot{q}) &= -m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{q}_3, \\ c_{23}(q, \dot{q}) &= -m_2 l_1 l_2 S_3 (\dot{q}_2 + \dot{q}_3), \\ c_{31}(q, \dot{q}) &= m_2 l_1 l_2 S_{23} C_2 \dot{q}_1 + m_2 l_2^2 S_{23} C_{23} \dot{q}_1, \\ c_{32}(q, \dot{q}) &= m_2 l_1 l_2 S_3 \dot{q}_2, \end{aligned}$$

donde  $S_i = \sin(q_i)$ ,  $C_i = \cos(q_i)$ ,  $S_{ij} = \sin(q_i + q_j)$ ,  $C_{ij} = \cos(q_i + q_j)$ ; y finalmente

$$G(q) = g \begin{bmatrix} 0 \\ g_1(q) \\ g_2(q) \end{bmatrix},$$

con:

$$\begin{aligned} g_1(q) &= m_1 l_1 \cos(q_2) + m_2 l_1 \cos(q_2) + m_2 l_2 \cos(q_2 + q_3), \\ g_2(q) &= m_2 l_2 \cos(q_2 + q_3), \end{aligned}$$

los parámetros  $m_i, l_i, i = 1, 2$  y  $I_j, j = 1, 2, 3$  son dados en la tabla I.

Las perturbaciones acopladas consideradas son incertidumbre del modelo, variación en los parámetros, fricción del modelo dinámico del robot Pegasus.

Descripción	Notación	Valor	Unidades
Longitud eslabón 1	$l_1$	0.297	m
Longitud eslabón 2	$l_2$	0.297	m
Masa eslabón 1	$m_1$	0.38	Kg
Masa eslabón 2	$m_2$	0.34	Kg
Inercia 1	$I_1$	$0.243 \times 10^{-3}$	$Kgm^2$
Inercia 2	$I_2$	$0.068 \times 10^{-3}$	$Kgm^2$
Inercia 3	$I_3$	$0.015 \times 10^{-3}$	$Kgm^2$
Constante gravitacional	$g$	9.8	$m/s^2$

**Tabla 1** Parámetros del robot Pegasus  
Fuente: Elaboración Propia

### Formulación del problema

Sea el sistema dinámico definido en (10) para el cual se propone el siguiente objetivo de control.

## Objetivo de control

El problema de control de movimiento de la clase de robots manipuladores bajo estudio se formula de la siguiente manera: dada la ecuación dinámica y dado un conjunto de funciones vectoriales acotadas  $q_d(t)$ ,  $\dot{q}_d(t)$  y  $\ddot{q}_d(t)$  referidas como posiciones, velocidades y aceleraciones articulares deseadas respectivamente, encontrar la entrada de control  $\tau(t)$ , de tal forma que las posiciones  $q(t)$  asociadas a las coordenadas articulares del robot sigan con precisión a  $q_d(t)$ , es decir:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|q(t) - q_d(t)\| = 0, \quad (14)$$

para una condición arbitraria  $q(0)$  en presencia de disturbios externos.

*Proposición 1* Se propone el siguiente controlador por pre-compensación, de la forma: (15)

$$\tau(t) = M(q_d)\ddot{q}_d + C(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d + g(q_d) - K_p x_1 - K_v x_2 + u(t),$$

donde  $K_p, K_v \in \mathbb{R}^{l \times l}$  son matrices simétricas y definidas positivas, que llevan al robot manipulador a la posición deseada, la estructura del controlador también utiliza la dinámica del robot manipulador evaluada en el movimiento deseado y por último un atenuador de disturbios  $u(t)$  de finido en (5).

Se define el vector de error de posición y el vector de error de velocidad como  $x_1(t) = q(t) - q_d(t)$  y  $x_2(t) = \dot{q}(t) - \dot{q}_d(t)$ , respectivamente.

La representación del sistema en lazo cerrado (10) y (15), en términos del error  $x = [x_1 \ x_2]^T$ , es dado por: (16)

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= M^{-1}(x_1 + q_d)[h_1(t, x) - h_2(t, x) + u + w_m], \end{aligned}$$

donde  $w_m(t)$  es la perturbación acoplada,  $h_1(t, x) = -C(x_1 + q_d, x_2 + \dot{q}_d)x_2 - K_p x_1 - K_v x_2$  y la dinámica residual se define como:  $h_2(t, x) = [M(x_1 + q_d) - M(q_d)]\ddot{q}_d + [C(x_1 + q_d, x_2 + \dot{q}_d)]\dot{q}_d + g(x_1 + q_d) - g(q_d)$ .

*Propiedad 4* La norma de la dinámica residual satisface:

$$\|h(t, x)\| \leq K_{h1}\|x_2\| + K_{h2}\|\tanh(x_1)\|,$$

donde  $\tanh(x) = [\tanh(x_1), \dots, \tanh(x_n)]^T$ , con  $\tanh(x) := \frac{e^{xi} - e^{-xi}}{e^{xi} + e^{-xi}}$ ,  $K_{h1}$  y  $K_{h2}$  satisfacen:

$$\begin{aligned} K_{h1} &\geq K_{c1}\|\dot{q}_d\|_{\infty}, \\ K_{h2} &\geq \frac{\sigma_2}{\tanh\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)}, \end{aligned}$$

donde  $\sigma_1 = K_g + K_M\|\ddot{q}_d\|_{\infty} + K_{c1}\|\dot{q}_d\|_{\infty}^2$ ,  $\sigma_2 = 2[K' + K'_M\|\ddot{q}_d\|_{\infty} + K_{c1}\|\dot{q}_d\|_{\infty}^2]$ ,

se supone que las cotas máximas de las normas de velocidad y aceleración deseada ( $\|\dot{q}_d\|_{\infty}, \|\ddot{q}_d\|_{\infty}$ ) se conocen.

Para la representación en espacios de estados del sistema en lazo cerrado (16) en la forma estándar de la estructura del control  $\mathcal{H}_{\infty}$  dada en (1) es conveniente definir las salidas del sistema, por lo tanto, las mediciones del vector de posición y del vector de velocidad, están disponibles, es decir

$$y(t) = x(t) + w_y(t), \quad (17)$$

son corrompidas por ruido en los sensores  $w_y(t) \in \mathbb{R}^n$ . La salida objetivo a ser controlada se propone, como:

$$z(t) = [u(t) \ \rho \tanh(x_1) \ \rho x_2]^T, \quad (18)$$

con la constante  $\rho$  es positiva. Finalmente, la representación en espacio de estados es de la forma:

$$f(t, x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ f_2(t, x) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

con  $f_2(t, x) = M^{-1}(x_1 + q_d)[-C(x_1 + q_d, x_2 + \dot{q}_d)x_2 - K_p x_1 - K_v x_2 - h(t, x)]$ ,

$$g_1(t, x) = \begin{bmatrix} 0_l & 0_{(l \times n)} \\ M^{-1}(x_1 + q_d) & 0_{(l \times n)} \end{bmatrix},$$

$$g_2(t, x) = \begin{bmatrix} 0_l \\ M^{-1}(x_1 + q_d) \end{bmatrix}, \quad h_1(t, x) = \begin{bmatrix} 0_l \\ \rho \tanh(x_1) \end{bmatrix}, \quad h_2(t, x) = x(t), \quad k_{12}(t, x) = \begin{bmatrix} I_1 \\ 0_{(n \times l)} \end{bmatrix}, \quad k_{21}(t, x) = [I_l \quad 0_{(n \times l)}],$$

donde la matriz  $0_{(n \times m)}$  se refiere a la matriz ceros de  $\dim(n \times m)$  y el vector de perturbaciones se define como  $w = [w_m \quad w_y]^T$ .

### Punto de equilibrio

Tomado de Kelly et al., (2005), se utiliza el teorema de contracción de mapas para determinar bajo que condición el origen es el único punto de equilibrio de la función  $f(t, x)$  en el sistema en lazo cerrado (15) libre de perturbaciones y con  $u(t) = 0$ . Los puntos de equilibrios son vectores constantes  $[x_1 \quad x_2]^T = [x_1^* \quad 0]^T$ ,  $x_1^* \in \mathbb{R}^l$ , donde  $x_1^*$  es una solución de la siguiente ecuación

$$K_p x_1^* + h(t, x_1^*, 0) = 0, \quad (20)$$

con  $x_1^* = 0$  es una solución (solución trivial) que satisface la ecuación anterior, pero puede haber otras soluciones para el vector  $x_1^*$  dependiendo de los valores que tome la matriz  $K_p$ .

A continuación, se define la función

$$\eta(x_1^*) = K_p^{-1} h(t, x_1^*, 0), \quad \vartheta, \varphi \in \mathbb{R}^l \quad (21)$$

Se analiza la condición de Lipschitz a la ecuación anterior, se sustituye la dinámica residual y se aplican las propiedades 1 a la 4, obtenemos:

$$\|\eta(\varphi) - \eta(\vartheta)\| \leq \frac{K_M \|\dot{q}_d\|_\infty - K_{c2} \|\dot{q}_d\|_\infty^2 + K_g}{\lambda_{\min}(K_p)} \|\varphi - \vartheta\|. \quad (22)$$

La constante de Lipschitz en (22) debe ser menor que uno para garantizar unicidad del punto de equilibrio, y por el teorema de contracción de mapas, tenemos que si la siguiente desigualdad

$$\lambda_{\min}(K_p) > K_M \|\dot{q}_d\|_\infty + K_{c2} \|\dot{q}_d\|_\infty^2 + K_g, \quad (23)$$

se satisface, entonces el origen es el único punto de equilibrio.

### Análisis y diseño del regulador de movimiento global $\mathcal{H}_\infty$

Para diseñar el regulador de movimiento global  $\mathcal{H}_\infty$  es necesario postular el siguiente teorema:

*Teorema 2* Considérese las siguientes funciones:

$$V(t, x) = \frac{1}{2} x_1^T K_p x_1 + \frac{1}{2} x_2^T M(x_1 + q_d) x_2 + \beta \tanh(x_1)^T M(x_1 + q_d) x_2, \quad \beta > 0$$

$$F(x) = \epsilon \tanh(x_1)^T \tanh(x_1) + \epsilon x_2^T x_2$$

donde  $V(x)$  será definida positiva para toda  $x(t) \in \mathbb{R}^n$  y para alguna  $\beta > 0$  si la desigualdad:

$$\lambda_{\min}(K_p) > \frac{\beta^2 \lambda_{\max}^2(M)}{\lambda_{\min}(M)}, \quad (25)$$

se cumple, entonces la hipótesis se satisface si:

$$\lambda_{\min}(K_v) > K_{h1} + \beta(b - \rho^2 - \epsilon), \quad (26)$$

$$\lambda_{\max}(K_p) > \beta^2 \lambda_{\max}(M),$$

$$K_{h2} - \rho^2 - \epsilon > \lambda_{\min}(K_v) > \left( \frac{(a + \frac{1}{2} K_{h2})^2}{\frac{1}{\beta} (\lambda_{\min}(K_v) - K_{h1}) - b + \rho^2 + \epsilon} + K_{h2} - \rho^2 - \epsilon \right),$$

donde  $a = \frac{1}{2} (\lambda_{\max}(K_v) + K_{c1} \|\dot{q}_d\|_\infty + K_{h1})$  y  $b = \lambda_{\max}(M) + \sqrt{n} K_{c1}$  y  $\epsilon > 0$  es una constante suficientemente pequeña.

Se cumplen.

*Demostración.* La desigualdad de Hamilton-Jacobi-Isaacs se separa para su análisis en dos partes:

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_1 + \mathcal{H}_2$$

$$\text{donde}$$

$$\mathcal{H}_1 = \frac{\partial V(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial V(t, x)}{\partial x} f(t, x) + h_1^T(t, x) h_1(t, x) + F(x)$$

$$\mathcal{H}_2 = \gamma^2 \alpha_1^T(t, x) \alpha_1(t, x) - \alpha_2^T(t, x) \alpha_2(t, x)$$

Tenemos a  $\mathcal{H}_1$  como:

$$\mathcal{H}_1 = -x_2^T K_v x_2 - x_2^T h(t, x) + \beta x_2^T M(x_1 + q_d) \text{sech}^2(x_1) x_2 + \beta \tanh^T(x_1) C(x_1 + q_d, x_2 + \dot{q}_d)^T x_2 - \beta \tanh^T(x_1) K_p x_1 - \beta \tanh^T(x_1) K_v x_2 - \beta \tanh^T(x_1) h(t, x) +$$

$$\rho^2 \tanh^T(x_1) \tanh(x_1) + \rho^2 x_2^T x_2 + \epsilon \tanh^T(x_1) \tanh(x_1) + \epsilon x_2^T x_2.$$

Aplicando las propiedades 1 - 4 en la ecuación anterior y representarlo en su forma matricial, se obtiene la siguiente expresión:

(27)

$$\mathcal{H}_1 < -\beta \begin{bmatrix} \|\tanh(x_1)\| \\ \|x_2\| \end{bmatrix}^T Q_1 \begin{bmatrix} \|\tanh(x_1)\| \\ \|x_2\| \end{bmatrix},$$

donde:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} q_{111} & -a - \frac{1}{2\beta} K_{h2} \\ -a - \frac{1}{2\beta} K_{h2} & q_{122} \end{bmatrix},$$

$$\text{y } q_{111} = \lambda_{\min}(K_p) - K_{h2} + \rho^2 + \epsilon,$$

$$q_{122} = \frac{1}{\beta} (\lambda_{\min}(K_v) - K_{h1}) - b + \rho^2 + \epsilon.$$

Si los elementos de las matrices  $K_p, K_v$  son seleccionados apropiadamente, de acuerdo con las siguientes desigualdades:

$$\lambda_{\min}(K_v) > K_{h1} + \beta(b - \rho^2 - \epsilon)$$

$$\lambda_{\min}(K_p) > K_{h2} - \rho^2 - \epsilon$$

$$\lambda_{\min}(K_p) > \left( \frac{(a + \frac{1}{2\beta} K_{h2})^2}{\frac{1}{\beta} (\lambda_{\min}(K_v) - K_{h1}) - b + \rho^2 + \epsilon} + K_{h2} - \rho^2 - \epsilon \right)$$

Entonces  $Q_1$  será una matriz definida positiva para toda  $q(t) \in \mathbb{R}^l$ , esta condición es necesaria y suficiente para asegurar que (27) es una función definida negativa.

Para desarrollar  $\mathcal{H}_2$  es necesario obtener las funciones  $\alpha_1(t, x)$  y  $\alpha_2(t, x)$  de las ecuaciones (5) y (6) utilizando el gradiente de la función de Lyapunov y sustituyendo el resultado en  $\mathcal{H}_2$  se tiene que:

$$\mathcal{H}_2 = -\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{4\gamma^2}\right) x_2^T x_2 - \left(\frac{\beta}{2} - \frac{\beta}{2\gamma^2}\right) x_2^T \tanh(x_1) - \left(\frac{\beta^2}{4} - \frac{\beta^2}{4\gamma^2}\right) \tanh^T(x_1) \tanh(x_1),$$

al aplicar las propiedades 1-4 y representarla en su forma matricial, obtenemos:

(28)

$$\mathcal{H}_2 \leq -\frac{1}{4} \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right) \begin{bmatrix} \|\tanh(x_1)\| \\ \|x_2\| \end{bmatrix}^T Q_2 \begin{bmatrix} \|\tanh(x_1)\| \\ \|x_2\| \end{bmatrix},$$

$$\text{con } Q_2 = \begin{bmatrix} \beta^2 & \beta \\ \beta & 1 \end{bmatrix}.$$

Al seleccionar constantes  $\gamma > 1$ ,  $\beta > 0$  entonces la matriz  $Q_2$  es semidefinida positiva, esto es una condición suficiente para garantizar que la función (28) es semidefinida negativa. La desigualdad de Hamilton-Jacobi-Isaacs es definida negativa si  $\lambda_{\min}(Q_1) + \frac{1}{4} \left(1 - \frac{1}{\gamma^2}\right) \lambda_{\min}(Q_2) > 0$  se satisface. ■

Una vez satisfecha la hipótesis se postula el siguiente teorema para la solución al problema de control  $\mathcal{H}_\infty$  en forma global.

**Teorema 3.** En base al teorema 1 el problema de control no lineal  $\mathcal{H}_\infty$  para el sistema no lineal (17) a la (19) se resuelve a través de la ley de control por retroalimentación de estados:

$$u(t, x) = -\frac{1}{2} (\beta \tanh(x_1) + x_2), \quad (29)$$

estabiliza asintóticamente el punto de equilibrio del sistema en lazo cerrado (17) a la (19) y (29) libre de perturbaciones y asegura que la ganancia  $\mathcal{L}_2$  del sistema en lazo cerrado (17) a la (19) y (29) para  $w \neq 0$  sea menor que  $\gamma$ .

En la tabla 2 se muestran los parámetros del robot manipulador para el diseño del controlador.

Parámetros	Valor	Unidad
$K_{c1}$	2.2229	$Kgm^2$
$K_{c2}$	33.152	$Kgm^2$
$K_M$	2.1594	$Kgm^2$
$K_g$	18.511	$Kgm^2$
$K'$	3.0852	$Kgm^2$
$K'_M$	0.9224	$Kgm^2$
$K_{h1}$	8.3489	$Kgm^2$
$K_{h2}$	509.19	$Kgm^2$
$\lambda_{MAX}(M)$	0.9224	$Kgm^2$
$\lambda_{min}(M)$	$0.243 \times 10^{-3}$	$Kgm^2$

**Tabla 2** Parámetros del robot Pegasus involucradas en el diseño del controlador

Fuente: Elaboración Propia

## Resultados

El experimento del regulador de movimiento se realizó en un robot manipulador (ver figura 1) marca AMATROL®. El brazo manipulador es requerido para que se desplace de la posición inicial  $q_1(0) = q_2(0) = q_3(0) = 0$  rad y siga las trayectorias generadas por las siguientes funciones:

$$q_{d1} = \frac{\pi}{2}(1 - e^{-2t^3}) + \frac{\pi}{2}(1 - e^{-2t^3})\sin(0.0006\pi t), \quad q_{d2} = \frac{\pi}{4}(1 - e^{-2t^3}) + \frac{\pi}{4}(1 - e^{-2t^3})\sin(0.0004\pi t), \quad \text{y} \quad q_{d3} = \frac{\pi}{8}(1 - e^{-2t^3}) + \frac{\pi}{8}(1 - e^{-2t^3})\sin(0.0002\pi t),$$

con las condiciones iniciales para el vector de velocidad en  $\dot{q}(0) \in \mathbb{R}^3$  igual a cero, se desarrolla la primera y segunda derivada temporal de la señal  $q_d(t)$  y se obtienen sus respectivas normas  $\|\dot{q}_d\|_\infty = 3$  y  $\|\ddot{q}_d\|_\infty = 5.31$ .

Las ganancias de las matrices de posición y velocidad propuestas son:

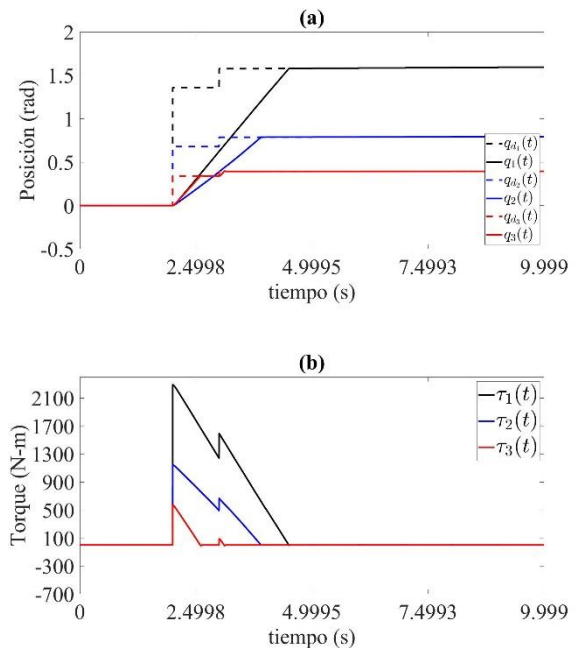
$$K_p = \text{diag}\{1689.6, 1685.6, 1684.6\}$$

$$K_v = \text{diag}\{5.9546, 4.9576, 3.9546\}$$

y los parámetros de diseño del control  $\mathcal{H}_\infty$  son:  $\rho = 0.1, \beta = 1.1, \epsilon = 0.01$ .

El objetivo de control (10) se satisface con el controlador propuesto como se observa en la figura 2-(a), sin embargo, la respuesta del sistema en lazo cerrado (ver figura 2-(a)) presenta un corrimiento para las articulaciones  $q_1(t), q_2(t)$  de aproximadamente 4.5s, este fenómeno se debe a la alta relación de engranes que compone la transmisión de la planta y que no fueron consideradas en el modelo matemático del robot. La respuesta de  $q_3(t)$  presenta una respuesta más rápida en comparación con las otras dos articulaciones esto se debe a la relación de la transmisión, la cual es menor a las otras dos.

En lo que respecta al experimento se observa (ver figura 2-(b)) que el vector de par aplicado en las articulaciones presenta ganancias altas en  $q_1(t), q_2(t)$ , con picos de 2500N-m, resultado de la ganancia elevada de la matriz  $K_p$  y sobre todo a la relación de vueltas en la transmisión acoplada a dichas articulaciones, en  $\tau_3(t)$  se presenta un pico de par aplicado de 500N-m, la razón de esta cantidad de par aplicado es la baja relación de la transmisión entre el actuador y la articulación respecto a las otras dos articulaciones.



**Figura 2** Resultados Experimentales del rendimiento del sistema en lazo cerrado con el regulador de movimiento global  $\mathcal{H}_\infty$  (4.3.2), donde a) es la posición articular  $q(t)$ , b) es el par aplicado  $\tau(t)$

Fuente: *Elaboración Propia*

## Conclusiones

En esta investigación se comprobó que la desigualdad de Hamilton-Jacobi-Isaacs para el problema del control  $\mathcal{H}_\infty$  en sistemas no lineales y variantes en el tiempo y restringido al caso particular del problema de seguimiento de trayectorias aplicado a un sistema Euler-Lagrange completamente actuado y con articulaciones de tipo rotacional se satisface con las funciones  $(V(x, t)$  y  $F(x))$  propuestas. Para este fin se propuso un controlador PD con pre-compensación en combinación con un controlador  $\mathcal{H}_\infty$ .

La verificación de la desigualdad de Hamilton-Jacobi-Isaacs para el control  $\mathcal{H}_\infty$ , fué posible gracias a la función estricta de Lyapunov Kelly et al. (2005), a la función definida positiva  $F(x)$  y por último al diseño apropiado de la función definida positiva  $h_1(x) = [0 \quad \rho \tanh(x_1) \quad \rho x_2]^T$  que ayudaron en el diseño del control  $\mathcal{H}_\infty$ , una aportación interesante surge de esta última función, porque de ella se desprende la salida objetivo a ser controlada y es la primera vez que se propone saturando uno de los estados de la planta con la función  $\tanh(x)$ . La finalidad de saturar el estado  $x_1$  en la salida objetivo fué para demostrar que la desigualdad de Hamilton-Jacobi-Isaacs fuera definida negativa, lo que resultó en un control  $\mathcal{H}_\infty$  saturado en el estado  $x_1$ .



Respeto a la ganancia del controlador se observó que los valores de los parámetros involucrados con la ganancia residual son directamente proporcionales en la ganancia de la matriz  $K_p$  y por obvias razones influye en el comportamiento del sistema en lazo cerrado.

## Referencias

- Arimoto, S. (1996). *Control Theory of Non-Linear Mechanical Systems: A Passivity-Based and Circuit-Theoretic Approach*. Nueva York, Estados Unidos de Norte América: Editorial Oxford University.
- Acho, L., Orlov Y. y Solis, V. (2001). Non-Linear measurement feedback  $\mathcal{H}_\infty$ -control of time-periodic systems with application to tracking control of robot manipulators. *International Journal of Control*, vol. 74 (2), 190-198.
- Aliyu, M. D. S. (2003). An approach for solving the Hamilton-Jacobi-Isaacs equation (HJIE) in nonlinear  $\mathcal{H}_\infty$  control. *Automatica*, Vol. 39 (5), 877-884.
- Aliyu, M. D. S. (2011). *Nonlinear  $\mathcal{H}_\infty$  Control, Hamiltonian Systems, and Hamilton Jacobi Equations*. Montreal, Canada: Editorial CRC.
- Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E. y Balakrishnan, V. (1994). *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*. Filadelfia, Estados Unidos de Norte América: Editorial SIAM.
- Ball, J., Helton, J. y Walker, M. (1993).  $\mathcal{H}_\infty$  control for nonlinear systems with output feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 38 (4), 546-559.
- Castaño, F. y Fridman, L. (2006). Analysis and Design of Integral Manifolds for Systems with Unmatched Perturbations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 51 (5), 853-858.
- Chung, W., Fu, L. y Hsu, S. (2008). *Handbook of Robotics: Motion Control*. Londres, Inglaterra: Editorial Springer.
- Ud Din, S., Khan, Q., ur Rehman, F. y Akmeliawati, R. (2016). Robust control of underactuated systems: higher order integral sliding mode approach. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016. doi:10.1155/2016/5641478.
- Doyle, C., Glover, K., Khargonekar, P. y Francis, B. (1989). State-space solution to standard  $\mathcal{H}_2$  and  $\mathcal{H}_\infty$  control problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34 (8), 831-847.
- Ferreira, H., Rocha, P. y Sales, R. (2008). Galerkin method and weight function applied to nonlinear  $\mathcal{H}_\infty$  control with output feedback, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 16 (12), 1817-1843.
- Fridman, L., Barbo, J., Plestan, F. (2016). *Recent Trends in Sliding Mode Control*. Londres, Inglaterra: Editorial IET.
- Galvan, G.R., Fridman, L. (2015). Robustification of time varying linear quadratic optimal control based on output integral sliding modes. *IET Control Theory and Applications*, vol. 9 (4), 563-572.
- Glad, S. (1987). Robustness of nonlinear state feedback: a survey. *Automatica*, Vol. 23 (4), 425-435.
- Hardt, M., Helton, J. y Kreutz, K. (2000). Numerical solution of nonlinear  $\mathcal{H}_2$  and  $\mathcal{H}_\infty$  control problems with application to jet engine compressors. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, Vol.8 (1), 98-111.
- Helton, J. y James, M. (1999). *Extending  $\mathcal{H}_\infty$  Control to nonlinear systems-Control of nonlinear systems to achieve performance objectives*. Filadelfia, Estados Unidos de Norte América: Editorial SIAM.
- Isidori, A. y Astolfi, A. (1992). Disturbance attenuation and  $\mathcal{H}_\infty$ -control via measurement feedback in nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 37 (9), 1283-1293.
- Kelly, R., Santibañez, V. y Loria, A. (2005). *Control of Robot Manipulators in Joint Space*. Londres, Inglaterra: Editorial Springer Verlag.
- Krstić, M. y Deng, H. (1998). *Stabilization of Nonlinear Uncertain Systems, Communications and Control Engineering*. Londres, Inglaterra: Editorial Springer.

- Kumar, P. R., Chalanga, A. y Bandyopadhyay, B. (2015). Smooth integral sliding mode controller for the position control of Stewart platform. *ISA Transaction*, vol. 58, 543-551. doi: 10.1016/j.isatra.2015.06.003.
- Levant, A. (2010). Chattering analysis. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.55 (6), 1380-1389.
- Lukes, D. (1969). Optimization regulation of nonlinear dynamical systems. *SIAM Journal on Control*, Vol.7 (1), 75-100. doi: 10.1137/0307007.
- Meza, I., Aguilar, L., Shiriaev, A., Fridovich, L. y Orlov, Y. (2011). Periodic motion planning and nonlinear  $\mathcal{H}_\infty$  tracking control of a 3-DOF underactuated helicopter. *International Journal of Systems Science*, Vol. 42 (5), 829-838.
- Orlov, Y. y Aguilar, L. (2004). Non-smooth  $\mathcal{H}_\infty$ -position control of mechanical manipulators with frictional joints. *International Journal of Control*, Vol. 77 (11), 1062-1069.
- Orlov, Y. y Aguilar, L. (2014). *Advanced  $\mathcal{H}_\infty$  Control: Towards Nonsmooth Theory and Applications*. Nueva York, Estados Unidos de Norte América: Editorial Birkhäuser.
- Osuna, T., Montaña, O.E. y Orlov, Y. (2016). Nonlinear  $\mathcal{L}_2$ -Gain analysis of hybrid systems in the presence of sliding modes and impacts. *Mathematical problems in Engineering*, Vol. 2016. doi: 10.1155/2016/9074096.
- Rubagotti, M., Castaño, F., Ferrara, A. y Fridman, L. (2011). Integral sliding mode control for nonlinear systems with matched and unmatched perturbations. *IEEE Transactions on automatic control*, Vol. 56 (11), 2699-2704.
- Sage, H., De Mathelin, M. y Ostertag, E. (1999). Robust control of robot manipulators: A survey, *International Journal of Control*, vol.72 (16), 1498-1522.
- Spong, M., Khorasani, K. y Kokotovic, P. (1987). An Integral Manifold Approach to the Feedback Control of Flexible Joint Robots. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.3 (4), 291-300.
- Spong, M. y Vidyasagar, M. (1989). *Robot Dynamics and Control*. Nueva York, Estados Unidos de Norte América: Editorial Wiley.
- Subbotin, A. (1995). *Generalized Solution of First-Order PDE's the Dynamical Optimization Perspective*. Boston, Estados Unidos de Norte America: Editorial Birkhäuser.
- Utkin, V., Guldner, J. y Shi, J. (2009). *Sliding Modes Control in Electromechanical Systems*. Nueva York, Estados Unidos de Norte América: Editorial CRC.
- Utkin, V. (1992). *Sliding Modes in Control Optimization*. Berlin, Alemania: Editorial Springer-Verlag.
- Utkin, V. y Lee, H. (, 2006). Chattering problem in sliding mode control systems. *Proceeding of the 2006 International Workshop on Variable Structure Systems*, Alghero, Italy, 346-350.
- Van der Schaft, A. J. (1992).  $\mathcal{L}_2$ -gain analysis of nonlinear systems and nonlinear state feedback  $\mathcal{H}_\infty$  control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 37 (6), 770-784.
- Wen, J. y Jian, X. (2004). Nonlinear Integral type Sliding surface for both Matched and Unmatched Uncertain Systems. *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol 49 (8), 1355-1360. doi: 10.1109/TAC.2004.832658.
- Yim, J. y Park, J. (1999). Nonlinear  $\mathcal{H}_\infty$  control of robotic manipulator. *1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetic*. Conferencia llevada a cabo en IEEE SMC'99 Conference Proceeding, Tokio, Japón.
- Zheng, B. y Park, J. (2015). Adaptive integral sliding mode control with bounded  $\mathcal{L}_2$ -gain performance of uncertain quantized control systems. *IET Control Theory Applications*, Vol. 9 (15), 2273-2282.

## Comparaciones ópticas y estructurales de las películas de Óxido de Silicio rico en Silicio (SRO) depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD

### Optical and structural comparisons of the Silicon rich Oxide (SRO) films deposited by LPCVD and HFCVD techniques

MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia†, LUNA-LÓPEZ, José Alberto\*, LUNA-FLORES, Adán y HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David

*Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores (CIDS-ICUAP) y Facultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), Av. San Claudio y 14 sur, Edif. 103C C.U., Col. San Manuel, Puebla 72570, México*

ID 1<sup>er</sup> Autor: Haydee Patricia, Martínez Hernández / ORC ID: 0000-0001-8863-4689, CVU: 353253

ID 1<sup>er</sup> Coautor: José Alberto, Luna-López / ORC ID: 0000-0002-7647-3184, CVU CONACYT ID: 200808

ID 2<sup>do</sup> Coautor: Adán, Luna-Flores / ORC ID: 0000-0003-2407-7072, CVU CONACYT ID: 95509

ID 3<sup>er</sup> Coautor: José Álvaro David, Hernández-De la Luz / ORC ID: 0000-0002-7913-0240, CVU CONACYT ID: 240901

DOI:10.35429/JOES.2019.21.6.19.25

Recibido 20 Agosto Julio, 2019; Aceptado 30 de Diciembre, 2019

#### Resumen

Este trabajo describe el estudio comparativo de las propiedades ópticas y estructurales de las películas de Óxido de Silicio Rico en Silicio depositadas por dos técnicas de depósito químico en fase vapor: a Baja Presión (LPCVD) y activado por Filamento Caliente (HFCVD). Las películas de SRO-LPCVD fueron depositadas a la razón de presiones de silano y óxido nitroso ( $R_0 = P_{N_2O}/P_{SiH_4}$ ) de  $R_0=10$  y  $R_0=25$ . Las películas de SRO-HFCVD fueron depositadas a una presión de hidrógeno de 25 y 100 sccm, a una distancia entre fuente y sustrato de 8 mm. Para mejorar las propiedades ópticas hemos sometido las películas obtenidas por ambas técnicas a un tratamiento térmico a altas temperaturas. Las caracterizaciones ópticas y estructurales que hemos utilizado para comparar las propiedades de ambas películas fueron: Espectroscopia nula, Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier y Fotoluminiscencia, Microscopia Electrónica de Barrido que corrobora los espesores de las películas de SRO obtenidos por espectroscopia nula, y Microscopia Electrónica de Transmisión de Alta Resolución que corrobora el tamaño del diámetro de los nanocristales de silicio (ncs-Si), los cuales también fueron calculados con la energía de la banda prohibida ( $E_g$ ) obtenida de los espectros de FL. Estas caracterizaciones muestran que las dos técnicas son excelentes alternativas para la obtención de películas de SRO con emisión fotoluminiscente, las cuales pueden ser usadas para dispositivos fotodetectores y electroluminiscentes.

SRO, LPCVD, HFCVD, FTIR, SEM, HRTEM, Fotoluminiscencia

#### Abstract

In this work, we conducted a comparative study of the optical and structural properties of Silicon Rich Oxide (SRO) films deposited by two chemical vapor deposition techniques: at Low Pressure (LPCVD) and activated by Hot Filament (HFCVD). SRO-LPCVD films were deposited at a silane and nitrous oxide pressures ( $R_0 = P_{N_2O}/P_{SiH_4}$ ) rate of  $R_0=10$  and  $R_0=25$ . SRO-HFCVD films were deposited at a hydrogen pressure of 25 and 100 sccm, at a distance between source and substrate of 8 mm. To improve the optical properties, we have subjected the films obtained by both techniques to thermal treatments at high temperatures. The optical and structural characterizations that we used for comparison of the films were: Null Spectroscopy, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Photoluminescence (FL), Scanning Electron Microscopy (SEM) and High-Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM). The SEM microscopy corroborates the thicknesses of the SRO films obtained by Null Spectroscopy, likewise, the HRTEM microscopy corroborates the diameter size of the silicon nanocrystals (ncs-Si), which also were calculated theoretically with the band gap energy ( $E_g$ ) obtained in the FL spectra. These characterizations show that either of the two techniques are excellent alternatives for obtaining SRO films with photoluminescent emission, which can be used for photodetector and electroluminescent devices.

SRO, LPCVD, HFCVD, FTIR, SEM, HRTEM, Photoluminescence

**Citación:** MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia, LUNA-LÓPEZ, José Alberto, LUNA-FLORES, Adán y HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David. Comparaciones ópticas y estructurales de las películas de Óxido de Silicio rico en Silicio (SRO) depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD. Revista de Sistemas Experimentales. 2019. 6-21: 19-24

\* Correspondencia al Autor (Correo electrónico: jose.luna@correo.buap.mx)

† Investigador contribuyendo como primer Autor

## Introducción

El silicio es el material por excelencia en la electrónica, debido a que es un elemento electropositivo, tetravalente en sus compuestos, siendo además el segundo elemento químico más abundante de la corteza terrestre después del oxígeno, por lo que es curioso que el dióxido de silicio se emplea como materia prima para producir silicio en volumen. El silicio en volumen, es un pobre emisor de luz, debido a que su banda de energía es indirecta.

El hecho de que Leigh Canham en 1990 [1] haya descubierto emisión visible en silicio poroso aún con algunos inconvenientes como degradación y escasa estabilidad [2], motivó a muchos investigadores para obtener materiales basados en silicio como el óxido de silicio fuera de estequiometría, también conocido como óxido de silicio rico en silicio (SRO), el cual es compatible con la tecnología CMOS existente [3-5]. Este material en sus caracterizaciones ópticas y estructurales ha mostrado excelente respuesta fotoluminiscente a temperatura ambiente.

Existen varios métodos para la obtención de películas de SRO entre las que se encuentran: la implantación de silicio en óxido de silicio (SITO), Depósito mediante Láser Pulsado (PLD) y mediante técnicas basadas en Depósito Químico en Fase vapor (CVD), por sputtering, por sol-gel. No obstante, este trabajo reporta un estudio comparativo de las características estructurales y ópticas de las películas de SRO obtenidas por dos técnicas de deposición química en fase vapor (CVD): a baja presión LPCVD y activado por filamento caliente (HFCVD).

Las películas de SRO obtenidas por LPCVD y tratadas térmicamente a 1100 °C durante 3 horas en ambiente de nitrógeno, modifican su exceso de silicio, variando las presiones parciales de los gases precursores: Silano y el Óxido nitroso. Mientras que la técnica HFCVD es un método que utiliza el hidrógeno molecular que se disocia en hidrógeno atómico con la temperatura de filamentos calientes y decapa fuentes sólidas de cuarzo para obtener precursores volátiles que se depositan en forma de películas delgadas o polvos de SRO, mismas que también son tratadas térmicamente a 1100°C durante 1 hora en ambiente de nitrógeno.

Las propiedades ópticas y estructurales debido al contenido de exceso de silicio y defectos en el SRO hacen a estas películas obtenidas por las dos técnicas anteriores, muy atractivas para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos [9], dando lugar a varios tipos de aplicaciones como guías de onda, memorias no volátiles, supresores de picos, dispositivos de detección y radiación de luz, etc. [6].

## Objetivo

Comparar las películas de Óxido de Silicio fuera de estequiometría (SRO), depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD, mediante caracterizaciones ópticas (espectroscopía nula, FTIR y Fotoluminiscencia) y estructurales (SEM y TEM).

## Desarrollo y metodología

Las películas de SRO se depositaron en un sistema LPCVD [2], mostrado en la *Figura 1* sobre obleas de silicio cristalino tipo p, de 4 pulgadas de diámetro, con orientación 100 y resistividad de 1-5  $\Omega$ -cm. Las obleas fueron cortadas en cuatro partes y marcadas para someterlas a un proceso de limpieza CMOS [3-5]. Para el sistema LPCVD, dos tipos de razones de flujos fueron utilizados:  $R_0=10$  y  $R_0=25$  con la variación de las presiones de los flujos de gases silano ( $\text{SiH}_4$ ) diluido en  $\text{N}_2$  y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) de acuerdo a la ecuación  $R_0 = P_{\text{N}_2\text{O}} / P_{\text{SiH}_4}$ , el flujo de los gases se controla con un sistema de control de rotámetros (Ver *Figura 1*). Para ambas películas se utilizó la misma presión y flujo del  $\text{SiH}_4$  0.92 y torr 5.1 slpm, respectivamente, mientras que la presión y flujo del  $\text{N}_2\text{O}$  y el tiempo fueron diferentes para cada depósito, es decir, para las películas  $R_0=10$  se utiliza la  $P_{\text{N}_2\text{O}} = 0.31$  torr ( $F_{\text{N}_2\text{O}} = 4$  slpm) por 17 minutos, y para la película  $R_0=25$  se utilizó la  $P_{\text{N}_2\text{O}} = 0.76$  torr ( $F_{\text{N}_2\text{O}} = 3.4$  splm) por 30.5 minutos.

Este sistema LPCVD mantiene una temperatura uniforme en toda el área de la cámara de depósito, debido a que tiene tres zonas de calentamiento, con un área plana de 2 grados centígrados (°C), en donde se colocan horizontalmente las obleas de silicio cortadas y marcadas en un soporte plano de cuarzo.

Posterior al depósito, las películas fueron sometidas a un tratamiento térmico a  $1100^{\circ}\text{C}$  por 180 minutos en ambiente de  $\text{N}_2$  con la finalidad de adquirir mejores propiedades foto y electroluminiscentes.

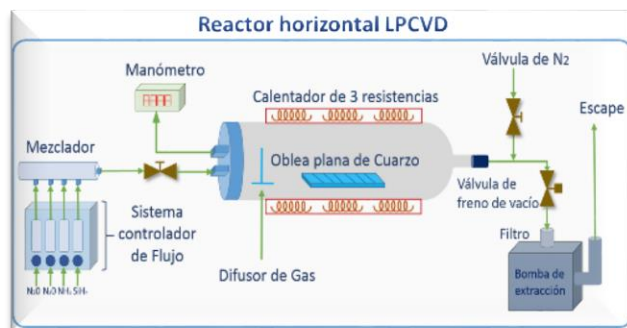


Figura 1 Reactor Horizontal LPCVD

La Figura 2 muestra el reactor HFCVD [3], utilizado para el depósito de las películas de SRO, sobre obleas de silicio de 2 pulgadas de diámetro, tipo P, orientación 100, resistividad baja  $1\text{-}5\ \Omega\text{-cm}$  y espesor de 300 micras. Las obleas de silicio son cortadas en 2 partes, se marcan y se pasan por un proceso estándar de limpieza tipo MOS [3-5].

Estos depósitos se llevaron a cabo con dos flujos de hidrógeno molecular ( $\text{H}_2$ ): 25 y 100 sccm, para las películas ( $\text{SRO}_{25}$  y  $\text{SRO}_{100}$ ). Cada flujo fue introducido al reactor vertical HFCVD donde se disocia el hidrógeno molecular a la temperatura de  $2000^{\circ}\text{C}$  obtenido con los 11 filamentos colocados dentro del reactor, a los cuales se les suministra un voltaje de 74 V con una corriente de 38 A.

Los  $2000^{\circ}\text{C}$  provocan una disociación del hidrógeno convirtiéndolo en hidrógeno atómico el cual es altamente reactivo, por lo que decapa las 11 fuentes sólidas de cuarzo colocadas abajo de los 11 filamentos incandescentes a una distancia ( $d_{fr}$ ) de 6 mm, obteniéndose así los precursores volátiles que se depositan y adsorben en la superficie del sustrato caliente el cual se ubica abajo de las 11 fuentes de cuarzo a una distancia ( $d_{fs}$ ) de 8mm [3,6], el tiempo de cada depósito ( $t_d$ ) fue de 3 minutos. Posteriormente estas películas pasan por un recocido térmico en ambiente de Nitrógeno a una temperatura de  $1100^{\circ}\text{C}$  por 60 minutos.

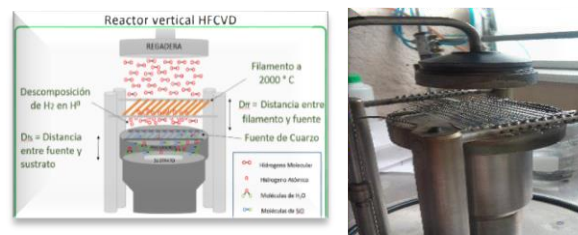


Figura 2 Reactor Vertical HFCVD

El espesor e índice de refracción de todas las películas de SRO depositadas por las dos técnicas LPCVD y HFCVD sobre sustratos de silicio, fueron obtenidos con el elipsómetro Fairfield Modelo NJ 07004-2113.

Mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se obtuvieron los espectros de absorbancia y se identificaron los modos vibracionales característicos de las películas de SRO, el equipo usado fue un espectrofotómetro Bruker Vector 22 con fuente de infrarrojo, el rango utilizado fue de  $400\ \text{cm}^{-1}$  a  $2400\ \text{cm}^{-1}$  Fluoromax-3 de la marca Horiba Jobin Yvon fue utilizado para medir la Fotoluminiscencia de las películas de SRO a temperatura ambiente, excitadas a una radiación de 400 a 900 nm.

Todas las caracterizaciones anteriores fueron analizadas antes del tratamiento térmico (STT) y después del tratamiento térmico (CTT). Las micrografías para observar las interfaces entre el Si y las películas fueron tomadas con un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) JEOL-JSM-7800F. El Microscopio electrónico de transmisión (TEM) JEM-ARM200F, fue utilizado para observar la formación de nanocristales de silicio (ncs-Si) en las películas de SRO

Temperatura	Película	Espesores (nm)		Índice de Refracción (n)		Exceso de Silicio CTT (%)	Diámetro de Ncs-Si (nm)
		STT	CTT	STT	CTT		
25°C	R0=10	89.7±9.8	76.3±5.4	1.69±0.017	1.72±0.012	16	4.15±0.85
	R0=25	105.9±7.5	90.3±2	1.55±0.008	1.57±0.032	14.2	5.05±0.25
100°C	SRO25	322.9±2.6	296.3±2.1	2.46±0.03	1.3±0.04	5.5	3.9±0.10
	SRO100	319.6±4.7	283.5±3.2	2.039±0.35	1.3±0.08	5.0	4.14±0.14

Tabla 1 Películas de SRO-LPCVD y SRO-HFCVD con los espesores, índices de refracción, excesos de silicio y diámetro del ncs-Si

## Resultados y discusión

En la Tabla 1 se muestra la comparación en espesores, índices de refracción, exceso de silicio y diámetro de ncs-Si de las películas obtenidas mediante las dos técnicas LPCVD y HFCVD. Podemos observar en la Tabla 1, que las películas  $R_0=10$  y  $R_0=25$  depositadas por la técnica LPCVD (SRO-LPCVD), son más delgadas que las películas SRO<sub>25</sub> y SRO<sub>100</sub> depositadas por la técnica HFCVD (SRO-HFCVD), sin embargo, ambas están consideradas como películas delgadas, debido a que ambas tienen espesores nanométricos (nm).

Una tendencia mostrada en todas las películas depositadas por ambas técnicas es que los espesores después del tratamiento térmico (CTT) se decrementan algunos nm, debido al reordenamiento atómico nanoestructural, modificándose la estequiometría estructural hacia el SiO<sub>2</sub>. Mientras que, el índice de refracción ( $\eta$ ), para las películas SRO-LPCVD incrementa CTT, para las películas SRO-HFCVD disminuye CTT.

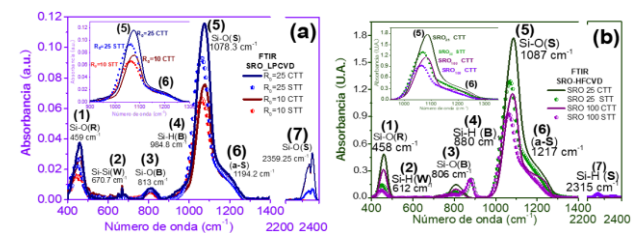
De acuerdo con la literatura el índice de refracción del silicio es  $\eta_{Si} \approx 3-4$  [2-5], mientras que para el SiO<sub>2</sub> es de  $\eta_{SiO_2} \approx 1.4$  [3-5], por lo que una película con  $\eta$  cercano al  $\eta_{Si}$  nos indicara un alto exceso de silicio y lo contrario para un valor cercano al del  $\eta_{SiO_2}$ . Si ajustamos este análisis a las películas depositadas por las dos técnicas CVD, observamos que los  $\eta$  de las películas SRO-LPCVD incrementaron ligeramente, indicando que el exceso de silicio aumenta, esto nos indica que efectivamente se está incorporando cierta cantidad de átomos de Silicio en exceso a la película, formándose los ncs-Si.

En cambio, que el  $\eta$  de las películas SRO-HFCVD CTT se decrementa, acercándose al  $\eta_{SiO_2}$ , es decir, está dejando de ser no estequiométrica, considerando que se están desorbiendo las especies O-H, Si-O-Si, Si-H que no se encuentran bien enlazados en la microestructura de la película.

La Figura 3, presenta los espectros de FTIR de las películas  $R_0=10$ ,  $R_0=25$  por las técnicas LPCVD en el inciso (a) y las películas SRO<sub>25</sub> y SRO<sub>100</sub> depositadas por la técnica HFCVD en el inciso (b).

En ambas figuras se pueden observar los modos vibracionales de los enlaces Si-O-Si, característicos del SiO<sub>2</sub> [2,3]; de balanceo ( $R=458$  cm<sup>-1</sup>), de doblamiento ( $B=812$  cm<sup>-1</sup>), de estiramiento en fase ( $S=1084$  cm<sup>-1</sup>) y fuera de fase ( $a-S=1177$  cm<sup>-1</sup>). Además de otros modos de vibración con menor intensidad de absorción como el pico a 620 cm<sup>-1</sup> que es debido a vibraciones Si-H (Wagging) [3,6], además de vibraciones alrededor de 2300 y 2360 cm<sup>-1</sup>, que corresponden a los enlaces de estiramiento asimétrico del Si-H ( $S=2300, 2360$  cm<sup>-1</sup>) [3,5]. También, se observa que la intensidad de absorbancia es mayor en los espectros de FTIR-HFCVD, debido a que los espesores de estas películas son más gruesas.

El punto de comparación de los espectros de las películas estudiadas se llevará a cabo mediante los modos vibracionales del SiO<sub>2</sub> listados en la Tabla 2. Por lo que destacamos que los picos (1), (3), (5) y (6) STT de ambas técnicas presentan un corrimiento hacia menores números de onda que el SiO<sub>2</sub>, esto muestra que el óxido es no estequiométrico, es decir, incrementa el número de enlaces Si-O fuera de estequiometría.



**Figura 3** Espectros de FTIR (a) Técnica LPCVD, (b) Técnica HFCVD

Mientras que en las muestras CTT estos espectros se recorren a mayores números de onda que el SiO<sub>2</sub> y se atribuye a un reordenamiento estructural y mejora la estequiometría, debido a la separación de fase del Si y SiO<sub>2</sub>. Puede observarse mejor en los recuadros de la Figura 3, la diferencia en las posiciones de los picos principales de la banda (S), donde un corrimiento hacia números de onda más altos se observa en las muestras CTT, siendo los espectros de las películas  $R_0=25$  (SRO-LPCVD) y SRO<sub>25</sub> (SRO-HFCVD) las que tienen el mayor cambio al desplazar su punto máximo de 1058 a 1075 cm<sup>-1</sup> y de 1065 a 1089 cm<sup>-1</sup> en los espectros FTIR-LPCVD y FTIR-HFCVD, respectivamente, además de que incrementan la intensidad de absorbancia y se estrecha el espectro de las muestras CTT.

Estos cambios indican el grado de desviación de la estequiometría, es decir, algunos de los estados de oxidación de la red de SiO<sub>x</sub>, la cual está formada por el tetraedro Si-(Si<sub>4-n</sub>-O<sub>n</sub>) con n = 0, 1, 2, 3 y 4, formándose: Si<sub>0</sub>, Si<sub>1+</sub>, Si<sub>2+</sub>, Si<sub>3+</sub> y Si<sub>4+</sub>, varían de acuerdo al exceso de silicio y al tiempo del depósito de la película, donde ocurren los procesos de absorción, difusión y desorción [5,6].

En lo referente a los picos (4) y (7), de acuerdo con Koshida [3], los modos de vibración Si-H flexión (875 cm<sup>-1</sup>) y Si-H estiramiento (2260 cm<sup>-1</sup>) están presentes en las películas debido a la incorporación de hidrógeno en el proceso de fabricación, no obstante, en las muestras CTT la desorción del hidrógeno ocasiona que estos modos vibracionales desaparezcan debido a las altas temperaturas. En la técnica HFCVD, se puede observar mejor este comportamiento.

Modos de vibración	Antes del tratamiento térmico				Después del tratamiento térmico				
	R <sub>0</sub> =25	R <sub>0</sub> =10	SRO <sub>25</sub>	SRO <sub>10</sub>	SiO <sub>2</sub>	R <sub>0</sub> =25	R <sub>0</sub> =10	SRO <sub>25</sub>	SRO <sub>10</sub>
(1) Si-O-Si en SiO <sub>2</sub> Balance (R)	[3,6]	455	439	449	458	459	466	459	458
(2) Si-H Menor (W)	[4,6]	609	609	609	609	669	669	612	612
(3) Si-O-Si en SiO <sub>2</sub> Doblamiento (B)	[3,5,6]	809	809	881	881	812	818	818	808
(4) Si-H Doblamiento (B)	[3,6]	938	936	-	-	942	943	-	-
(5) Si-O-Si en SiO <sub>2</sub> Estiramiento en fase (S)	[3,4,6]	1061	1065	1070	1062	1082	1082	1086	1083
(6) Si-O-Si Estiramiento fuera de fase (a-S)	[3,6]	1173	1168	1174	1171	1177	1191	1195	1227
(7) Si-H Estiramiento (S)	[4,5]	2261	2261	-	-	2313	2313	-	-

**Tabla 2** Modos de vibración de los espectros de FTIR del SiO<sub>2</sub> y de las películas SRO obtenidas por las Técnicas LPCVD y HFCVD

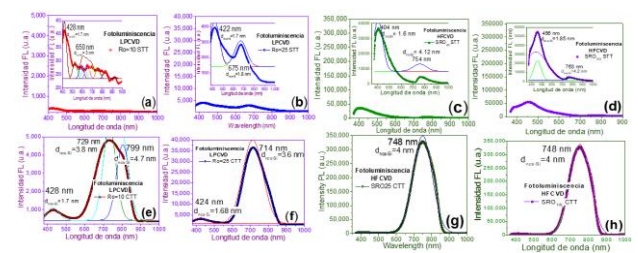
En la Figura 4 se muestran los espectros de emisión Fotoluminiscente (FL) de todas las películas analizadas de SRO depositadas por las técnicas LPCVD (a, b, e, f) y HFCVD (c, d, g, h), STT y CTT. Los incisos (a, b, c y d) muestran las películas de SRO de ambas técnicas STT, ampliándose estos espectros en los recuadros para su mejor visualización, mientras que en los incisos (e, f, g, h) se muestran las intensidades de FL CTT.

Las intensidades FL de las películas STT presentan un pico intenso y bien definido en el violeta (390-455 nm), el cual se atribuye a enlaces débiles de oxígeno ((WOB) [3-6], también se observan otros picos menos intensos en diferentes posiciones de la banda roja entre 622 y 780 nm, para los cuales se reporta que se debe a los Centros de huecos de oxígeno no ligados (NBOHC) y Centros E' ≡Si-O•O≡Si+ y Efectos de confinamiento cuántico (CQ) con interacción de la interface de los nc-Si y la matriz de óxido [3,6].

Observamos también en esta Figura 4 incisos (e, f, g, h) que todas las intensidades incrementaron CTT, un orden de magnitud, además el pico de mayor intensidad se observa en la banda roja e infrarroja cercana en donde los mecanismos de FL que intervienen en este proceso son los centros luminiscentes localizados en la interfaz de nc-Si/SiO<sub>2</sub> (CLI) y los efectos de confinamiento cuántico (QC) con interacción de la interface de los ncs-Si y la matriz de óxido.

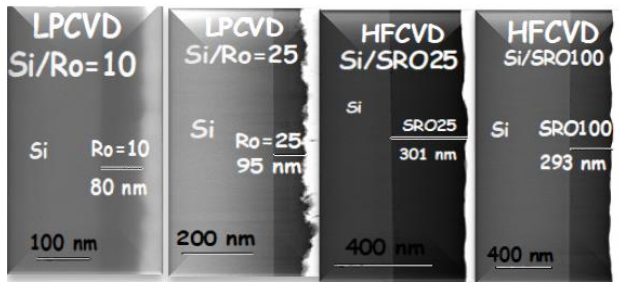
Seguidamente, la energía de la banda prohibida óptica (E<sub>g</sub>= hv) fue obtenida con la relación de la longitud de onda λ (nm): hv = 1239.7 / λ, y con el E<sub>g</sub> obtenido se calculó el tamaño de diámetro del ncs-Si con la ecuación: d=[3.73/(E<sub>g</sub>-1.12)]<sup>1/1.39</sup>, obteniendo que el tamaño del ncs-Si se puede encontrar desde 1.7 a 4.7 nm para los picos de mayor intensidad ubicados en las bandas azul y roja de los espectros de FL de las películas de ambas técnicas mostrándose en la Figura 4.

Las micrografías obtenidas por SEM de las películas aquí estudiadas CTT se observan en la Figura 5, para corroborar los espesores listados en la Tabla 1. Las micrografías obtenidas por HRTEM se muestran en la Figura 6, el tamaño del ncs-Si para la película R<sub>0</sub>=10 SRO-LPCVD oscila entre 3.3 y 4.4 nm, y el tamaño de los ncs-Si en las películas R<sub>0</sub>=25 SRO-LPCVD se observan más grandes oscilando entre 4.8 a 5.3 nm, además de que el número de ncs-Si es mayor que en cualquiera de las otras películas.



**Figura 4** Espectros de FL (a,b,e,f) Técnica LPCVD, (c,d,g,h) Técnica HFCVD

Para las películas SRO<sub>25</sub> SRO-HFCVD los ncs-Si observados oscilan entre 3.8 a 4 nm y en la película SRO<sub>100</sub>SRO-HFCVD incrementan ligeramente entre 4 y 4.28 nm. La respuesta FL, la E<sub>g</sub> y tamaño del ncs-Si, nos permiten potenciar varias aplicaciones de estas películas en el área de los dispositivos fotodetectores y electroluminiscentes.



**Figura 5** Micrografías SEM, de las películas  $R_0=10$ -LPCVD,  $R_0=25$ -LPCVD, SRO25-HFCVDy SRO100-HFCVD

## Conclusiones

Se estudiaron y compararon las propiedades ópticas y estructurales de las películas delgadas de SRO depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD. Un análisis de espectroscopia nula y de microscopía SEM, nos muestra que las películas fabricadas por la técnica LPCVD son más delgadas que las películas depositadas por la técnica HFCVD; sin embargo con la espectroscopia FTIR, se encontró una aproximación en la composición de las películas, con la presencia de hidrógeno en las películas fabricadas por la técnica HFCVD, lo que incrementa los defectos relacionados con el oxígeno e hidrógeno, aumentando la intensidad fotoluminiscente de las películas de SRO-HFCVD. Otros defectos también se formaron en las películas depositadas por LPCVD.

Así mismo en las cuatro películas CTT todas presentaron ncs-Si de un tamaño  $\approx 5$  nm, por lo que se puede considerar también la existencia de CQ, sin descartar los defectos existentes en las películas, responsables de los picos más intensos de la fotoluminiscencia observada en la figura 4.

## Acknowledgements

Este trabajo ha sido parcialmente respaldado por CONACyT-CB-255062 y VIEP-LULJ-EXC-2019. Los autores agradecen a CIDS, INAOE (Pablo Alarcón, V. Aca Aca, A. Hernández Flores, A. Itzmoyotl Toxqui e I. Juárez Ramírez) VIEP (Dr. Enrique González Vergara, Mtra. María Yadira Rosas Bravo).

## Referencias

[1] Canham, L. T. (1990). Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers.

[2] Hsuan-Ta Wu, *et al.*, (2019) Al-Doped ZnO/Silicon-rich Oxide Superlattices with High Room-Temperature Thermoelectric Figure of Merit.

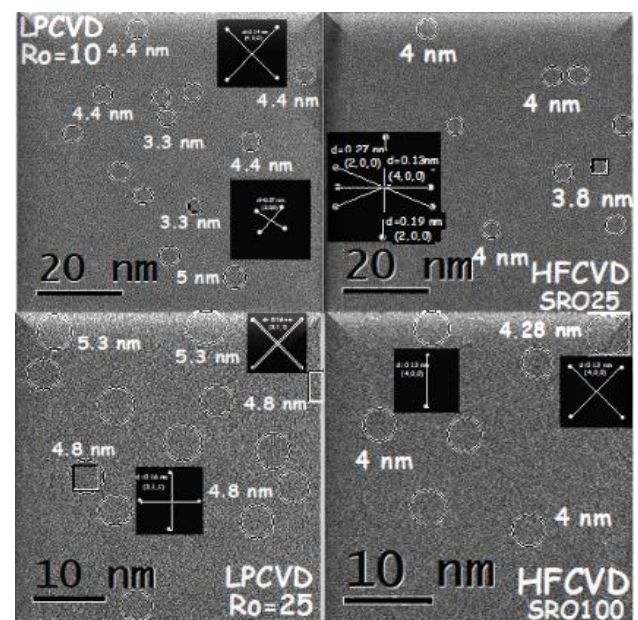
[3] Luna-López, J. A., *et al.*, (2010). FTIR, AFM and PL properties of thin SiO<sub>x</sub> films deposited by HFCVD. *Materials Science and Engineering: B*, 174(1-3), 88-92.

[4] Mingming Li *et al.*, (2019). The evolution of PL properties of hydrogenated Si-rich silicon carbide/amorphous carbon nano-multilayer films grown by PECVD

[5] A.O. Zamchiy, *et al.*, (2018). Effect of annealing in oxidizing atmosphere on optical and structural properties of silicon suboxide thin films obtained.

[6] J.R. Ramos-Serrano, *et al.*, (2019). Luminescent silicon oxycarbide thin films obtained with monomethylsilane by hot-wire chemical vapor deposition.

## Anexo



**Figura 6** Micrografías HRTEM, de las películas  $R_0=10$ -LPCVD,  $R_0=25$ -LPCVD, SRO25-HFCVDy SRO100-HFCVD



## Deshidratador solar híbrido para el secado de plátano

### Banana drying hybrid dehydrator

CAMACHO-MARTINEZ, Humberto Armando\*†, ANTONIO-GORDILLO, Diana Montserrat, ROBLES-OCAMPO, José Billerman y SEVILLA-CAMACHO, Perla Jazmín

*Universidad Politécnica de Chiapas, Ingeniería en Energía*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Humberto Armando, Camacho-Martinez* / ORC ID: 0000-0003-4864-7586, CVU CONACYT ID: 999386

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Diana Montserrat, Antonio-Gordillo* / ORC ID: 0000-0002-3979-0455 CVU CONACYT ID: 1019863

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *José Billerman, Robles-Ocampo* / ORC ID: 0000-0002-0094-8710, CVU CONACYT ID: 166936

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Perla Jazmín, Sevilla-Camacho* / ORC ID: 0000-0002-9702-1929 CVU CONACYT ID: 221004

DOI: 10.35429/JOES.2019.21.6.26.33

Recibido 09 Septiembre, 2019; Aceptado 28 Diciembre, 2019

#### Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un secador solar para el deshidratado de frutas. Para fines de análisis y evaluación se utiliza plátano como insumo. El sistema se abastece de la energía solar en forma fotovoltaica (PV) y fototérmica (PT). La parte PV del deshidratador consta de un panel solar, esta energía alimenta resistencias eléctricas para aumentar la temperatura del deshidratador. Asimismo, el sistema PV alimenta a un sistema de control y a un par de ventiladores, estos últimos forzan la circulación de aire dentro del sistema. Los ventiladores se localizan a la entrada y a la salida del deshidratador. Por otro lado, la parte PT se compone de un sistema de almacenamiento pasivo y captación de calor directa e indirecta. Para la elaboración del secador solar fue necesario tener en cuenta ciertos parámetros como: las condiciones meteorológicas (radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento), conductividad térmica, temperatura y propiedades de los componentes.

**Híbrido, Conductividad térmica, Humedad, Convección**

#### Abstract

In this work the design of a solar dryer for the dehydration of fruits is presented. Banana is used as raw material for analysis and evaluation purposes. The system is supplied with solar energy in the form of (photovoltaic) PV and (photothermic) PT. The PV part of the dehydrator consists of a solar panel, whose energy supplies electrical resistances to increase the temperature, also feeding a forced air convection system which is carried out with a pair of fans that are at the entrance and exit of the dehydrator, also a control and measurement system. In the other side the PT part consist in a passive storage system of heat direct and indirect catchment of radiation. For the development of the solar dryer it is necessary to take into account certain parameters such as: weather conditions (solar radiation, ambient temperature and wind speed), thermal conductivity, temperature and properties of the components.

**Hybrid, Thermal Conductivity, Humidity, Convection**

**Citación:** CAMACHO-MARTINEZ, Humberto Armando, ANTONIO-GORDILLO, Diana Montserrat, ROBLES-OCAMPO, José Billerman y SEVILLA-CAMACHO, Perla Jazmín. Deshidratador solar híbrido para el secado de plátano. Revista de Sistemas Experimentales. 2019. 6-21: 26-33

†Investigador contribuyendo como primer Autor

## Introducción

El secado de alimentos mediante la exposición a la radiación solar se ha realizado anteriormente como método práctico y de bajo costo de operación. Hoy en día, la deshidratación de alimentos sigue vigente tanto para productos comerciales que adquieren un valor agregado, así como para comunidades que utilizan los deshidratadores como su principal medio de conservación de alimentos.

En este trabajo se presenta el diseño y caracterización de un deshidratador solar híbrido, para la localidad de Suchiapa, Chiapas. El diseño de secadores solares se lleva a cabo para el secado de frutas, verduras o semillas con un funcionamiento directo y con circulación natural. Este proceso deriva en una disminución de contenido de agua y disminución de la cantidad de microorganismos del producto. Con este diseño se obtiene beneficios económicos y productivos por parte del productor, y al usar fuentes de energía renovables se evita contaminar el medio ambiente por el uso energía convencional. El uso del deshidratador solar otorga valor agregado a los excedentes de producción, teniendo así, más tiempo para comercializar o aprovechar los alimentos.

El sistema de deshidratado esta compuesta por: un colector térmico, compuesta por un área de 0.89 m<sup>2</sup> para la captación de radiación solar; por un sistema de almacenamiento pasivo de energía, integrada por por rocas; por un sistema de control, que se encarga de regular la temperatura del interior del deshidratador; y por resistencia eléctricas para darle estabilidad térmica durante días pocos favorables.

La convección forzada de aire en conjunto con el calor generado por las resistencias eléctricas le otorga al deshidratador una mayor tasa de protección con respecto al tiempo. La implementación de las resistencias y los ventiladores aumentan la velocidad y eficiencia del deshidratador.

El tiempo de secado de las frutas depende de varios factores tales como: tipo de producto, tamaño de los trozos, temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del aire. Para el secado se deben de tomar en cuenta distintas etapas:

- Inducción inicial: Cuando un sólido se coloca en un deshidratador, la absorción de calor y su temperatura hasta la fija de secado. Conforme la temperatura aumenta, la humedad dentro del sólido disminuye, hasta alcanzar un punto de equilibrio [4].
- Período de velocidad constante: En la Fig. 1 el punto “B” la temperatura se estabiliza y se comienza a crear una capa superficial de humedad. Entre los puntos “B” y “C” la evaporación desde la superficie es remplazada por la difusión del agua en el interior de sólido a la misma velocidad que lo hacía en la evaporación. Se estabiliza la velocidad de secado/unidad en la superficie [4].
- Decaimiento de la velocidad: En el punto “C”, el agua superficial se mantiene para conservar la humedad superficial. Comienzan a aparecer puntos en la superficie en la que la velocidad decae. Esto lleva el nombre humedad crítica [4].
- Humedad crítica: El punto “D” es conocido como el segundo punto crítico, aquí deje de ser constante la velocidad, el agua superficial ya a sido evaporada. En este punto las variables más importantes pasan a ser la porosidad y el tamaño de partícula del sólido en cuestión. Entre los puntos “D” y “E” la velocidad decae rápidamente y se denomina como “Segundo periodo de disminución de velocidad. En el punto E la velocidad de decae por completo, llegando a 0 y comienza el sólido a entrar en equilibrio con el medio [4].



Figura 1 Perfil de secado de un sólido [5]

## Metodología

El prototipo desarrollado es de carácter experimental, del cual se evalúa el desempeño y eficiencia del diseño de un deshidratador solar mixto o híbrido, que consta de una cámara de deshidratado, que permite la ejecución de procesos de transferencia de masa y calor para la obtención de alimentos deshidratados; un colector solar que en el interior cuenta con rocas el cual se encarga de absorber la energía térmica y transferirla hacia la cámara de secado, así como el aprovechamiento del efecto invernadero para aumentar la temperatura dentro de sistema; y un panel FV el cual alimenta los sistemas de control y medición como una resistencia eléctrica que tiene el fin de aumentar la temperatura del sistema.

## Sistema de control y medición

El sistema de control y medición se basó en la plataforma Arduino, este consta de dos partes principales: La programación lógica y el circuito electrónico. La primera de estos dos cumple con tres diferentes propósitos:

- Sensar las temperaturas en diferentes puntos del deshidratador en tiempo real.
- Controlar la convección por medio de relays y dictámenes lógicos que tienen como variante principal la temperatura promedio de la cámara de secado.
- Crear una base de datos para su posterior estudio y análisis, con las mediciones obtenidas de los diferentes sensores incluidos en el sistema, así como de promedios tanto de la cámara de secado como del colector.

```

1. #include <SD.h>
2. #include <SPL.h>
3. #include <DHT.h>
4. #include <DHT_U.h>
5.
6.
7. #define DHTPIN 8
8. #define DHTTYPE DHT22
9.
10. long seconds=00;
11. long minutes=00;
12. long hours=00;
13.
14. int CS_pin = 10;
15. int relay = 2;
16. float t;
17.
18. DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
19. File sd_file;
20.
21. void setup() {
22.
23.   pinMode(relay, OUTPUT);
24.   Serial.begin(9600);
25.   pinMode(CS_pin, OUTPUT);

```

```

26. dht.begin();
27. if (SD.begin()) {
28.   Serial.println("SD card is initialized. Ready to go");
29. }
30. else {
31.   Serial.println("Failed");
32.   return;
33. }
34.
35. sd_file = SD.open("data.txt", FILE_WRITE);
36.
37. if (sd_file) {
38.   Serial.print("Time");
39.   Serial.print(",");
40.   Serial.print("Humidity");
41.   Serial.print(",");
42.   Serial.print("Temperature_C");
43.   Serial.print(",");
44.   Serial.print("Temperature_F");
45.   Serial.print(",");
46.   Serial.println("Heat_index");
47.
48.   sd_file.print("Time");
49.   sd_file.print(",");
50.   sd_file.print("Humidity");
51.   sd_file.print(",");
52.   sd_file.print("Temperature_C");
53.   sd_file.print(",");
54.   sd_file.print("Temperature_F");
55.   sd_file.print(",");
56.   sd_file.println("Heat_index");
57. }
58. sd_file.close();
59. }
60.
61. void loop() {
62.
63.   sd_file = SD.open("data.txt", FILE_WRITE);
64.   if (sd_file) {
65.     senddata();
66.   }
67.   else {
68.     Serial.println("error opening file");
69.   }
70.   delay(1000);
71.
72.   t=dht.readTemperature();
73.   if (t>50){
74.     digitalWrite(2,HIGH);
75.   }
76.   //if (t<20) {
77.   //digitalWrite(2,LOW);
78.   //}
79. }
80.
81.
82. void senddata() {
83.   for(long seconds = 00; seconds < 60; seconds=seconds+2)
84.   {
85.     float temp = dht.readTemperature();
86.     float hum = dht.readHumidity();
87.     float fah = dht.readTemperature(true);
88.     float heat_index = dht.computeHeatIndex(fah, hum);
89.
90.     sd_file.print(hours);
91.     sd_file.print(",");
92.     sd_file.print(minutes);
93.     sd_file.print(",");
94.     sd_file.print(seconds);
95.     sd_file.print(", ");
96.     sd_file.print(hum);
97.     sd_file.print(", ");
98.     sd_file.print(temp);
99.     sd_file.print(", ");
100.    sd_file.print(fah);
101.    sd_file.print(", ");
102.    sd_file.println(heat_index);
103.
104.    Serial.print(hours);
105.    Serial.print(":");
106.    Serial.print(minutes);
107.    Serial.print(":");
108.    Serial.print(seconds);
109.    Serial.print(", ");

```

```

110. Serial.print(" ");
111. Serial.print(temp);
112. Serial.print(" ");
113. Serial.print(fah);
114. Serial.print(" ");
115. Serial.println(heat_index);
116.
117. if(seconds>=58) {
118.     minutes= minutes + 1;
119. }
120.
121. if (minutes>59) {
122.     hours = hours + 1;
123.     minutes = 0;
124. }
125.
126. sd_file.flush();
127.
128. delay(2000);
129. }
130. sd_file.close();
131. }

```

**Figura 2** Código utilizado para el sistema de control y medición

El sistema consta de 5 sensores DHT 22 para las mediciones de temperatura, así como un datalogg lm6490, como relays convencionales, una pantalla lcd para poder obtener una lectura en tiempo real, un par de ventiladores de 12 V, los cuales tienen la función de forzar la circulación del aire y conseguir la condición de convección forzada dentro del deshidratador.

## Cálculos

### Aporte energético del almacenamiento pasivo

Se calcula la cantidad teórica que las piedras pueden ofrecer como sistema de almacenamiento pasivo, teniendo como muestra una piedra escogida al azar de las usadas.

$$Cp_{PIEDRA} = \frac{(Cp_{AGUA})(m_{AGUA})(T_{2AGUA} - T_{1AGUA})}{(m_{PIEDRA})(T_{2PIEDRA} - T_{1PIEDRA})} \quad (1)$$

$$\text{Prueba 1: } Cp_{PIEDRA} = 1650 \frac{J}{kg} \text{ } ^\circ C$$

$$\text{Prueba 2: } Cp_{PIEDRA} = 1691.54 \frac{J}{kg} \text{ } ^\circ C$$

$$\text{Prueba 3: } Cp_{PIEDRA} = 1772.09 \frac{J}{kg} \text{ } ^\circ C$$

$$\text{Promedio de } Cp_{PIEDRA} = 1704.63 \frac{J}{kg} \text{ } ^\circ C$$

La cantidad de energía que puede ser absorbida por el sistema de forma ideal es de:

$$Cp_{total} = 2.56 \text{ MJ } ^\circ C$$

Teniendo en el porcentaje de energía que se puede recuperar de un lecho de piedras es de aproximadamente el 40 % [6].

$$Cp_{totalreal} = 1024 \text{ kJ } ^\circ C$$

## Energía aportada por la resistencia eléctrica

Se instalo en el interior de la cámara de deshidratado una resistencia eléctrica la cual es alimentada por un panel FV de DC, el cual tiene una potencia de 90 W. Teniendo en cuenta la literatura una resistencia eléctrica tiene una eficiencia que ronda el 58.3% [7]. Por lo que se puede calcular la energía aportada:

$$Er = 90 \text{ W} * 0.583 * 3600 \text{ s} \quad (2)$$

$$Er = 186 \text{ kJ}$$

## Energía de deshidratación

Donde “ $m_{fp}$ ” es la masa de agua pérdida en el proceso (kg); “ $Cv$ ”, el calor latente del agua a temperatura media (kJ/kg); “ $m_a$ ”, la masa del aire en un instante dado; “ $C_a$ ”, el calor específico del aire a presión constante (kJ/kg\*K); y temperatura de ingreso y salida del aire ( $^\circ C$ ) [3].

$$Q_d = m_{fp} (Cv) \quad (3)$$

$$Q_d = 1,332 \text{ kJ}$$

## Consumo específico de calor

En la ecuación 3, donde  $H_2$  es la entalpía final,  $H_1$  es la entalpía inicial,  $X_2$  es el contenido de humedad final y  $X_1$  es el contenido de humedad inicial. Cada valor de las variables hace referencia al aire seco [1].

$$q = \frac{(H_2 - H_1)}{(X_2 - X_1)} \quad (4)$$

$$q = 2,473.68 \frac{kJ}{kg}$$

## Coefficiente global de pérdidas

$U_{sup}$  es la conductividad térmica en la parte superior. En la ecuación 5 el calor se transfiere entre la placa de absorción y la cubierta interior por convección y radiación en forma paralela; esto mismo, también ocurre entre las dos cubiertas, interior y exterior. Los mismos mecanismos de transferencia son igualmente importantes en la disipación de calor por parte de la cubierta exterior hacia el ambiente [1,2].

$$U_{sup} = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[ \frac{(T_{pm} - T_a)}{(N-f)} + \frac{1}{h_w} \right]^e} \right\}^{-1}$$

$$+ \frac{\sigma(T_{pm}+T_a)(T_{pm}^2+T_a^2)}{(\epsilon_p+0.00591 N h_w)^{1+\frac{2N+f-1+0.133 \epsilon_p}{\epsilon_g}} N} \quad (5)$$

En la ecuación 6,  $U_{fo}$  es la conductancia en la parte inferior, donde  $k_a$  es la conductividad del aislante y  $x_b$  es la longitud transversal del aislante [2].

$$U_{fo} = \frac{k_a}{x_b} = 0.22 \quad (6)$$

$U_l$  es la conductancia en la parte lateral, las pérdidas de calor a través de los lados del colector se evalúan de manera similar, aplicando la ecuación anterior. Donde  $k_{a'}$  es la conductividad del aislante lateral,  $A_{lateral}$  es el área y  $x_b$  es el espesor del aislante por los lados, representada en la ecuación 7 [2].

$$U_l = \frac{k_{a'} A_{lateral}}{x_b A_c} = 0.24912 \quad (7)$$

Finalmente, la evaluación del coeficiente total de transferencia de calor para todo el colector está representada por la sumatoria de las tres conductancias indicadas anteriormente; es decir, inferior, superior y lateral [2].

$$U_L = U_t + U_b + U_e = 2.18908 \quad (8)$$

## Diseño

El diseño del sistema consta de tres componentes principales, los cuales son; una cámara de secado, un colector solar y la unión entre estos, estas tres secciones fueron diseñadas cada una con un propósito en específico.

En la siguiente Fig. 3 se observa la cámara de secado, se diseñó con el espacio suficiente para la colocación de 4 bandejas para la materia a secar, las cuales suman una capacidad total de 15 kg. Incluye una salida de aire la cual esta destinada para la colocación del ventilador, a la vez que deja espacio disponible para poder tener una mayor área para la convección natural. La cual se encuentra rellena de aislante térmico para evitar pérdidas.

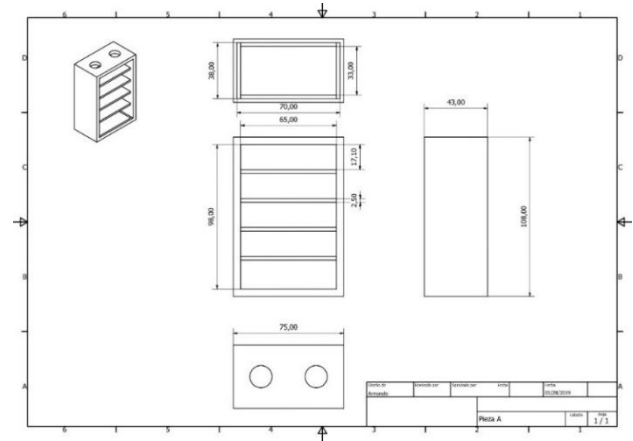


Figura 3 Cámara de secado

El diseño del colector se encuentra en la Fig. 4, el cual cuenta con área superficial de 0.89 m<sup>2</sup>, a su vez en esta misma estructura se depositan las rocas que actúan como almacenamiento térmico. En su diseño también se incluye una entrada de aire, en la cual se encuentra ubicado el ventilador de entrada para la convección forzada. Su principal función es la de captar la radiación solar, para poder aprovecharla y aumentar la temperatura del sistema.

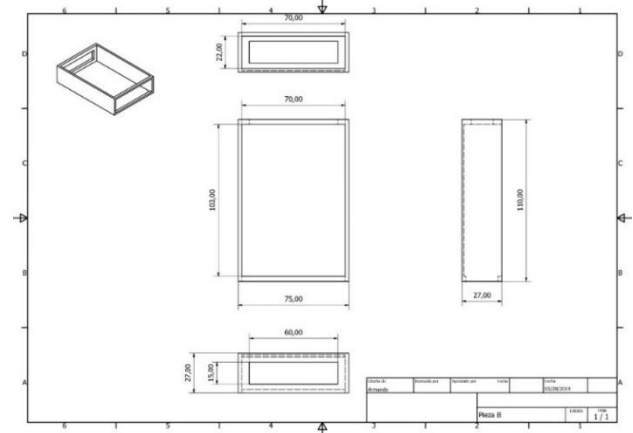
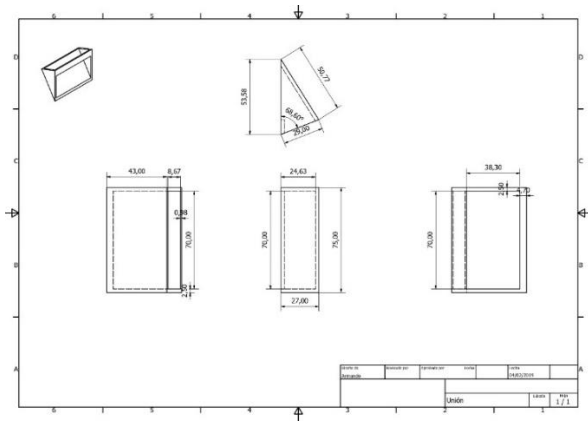


Figura 4 Colector solar plano

En la Fig. 5 se muestra el plano de la unión entre el colector y la cámara de secado. El cual se encontraba recubierto por aislante térmico, con la intención de disminuir en la medida de lo posible las pérdidas de calor en el sistema.



**Figura 5** Unión de la cámara de secado con el colector solar

En la Fig. 6 se observa el deshidratador puesto en marcha y en operación, el cual cuenta con una capacidad de 15kg con producto a deshidratar.

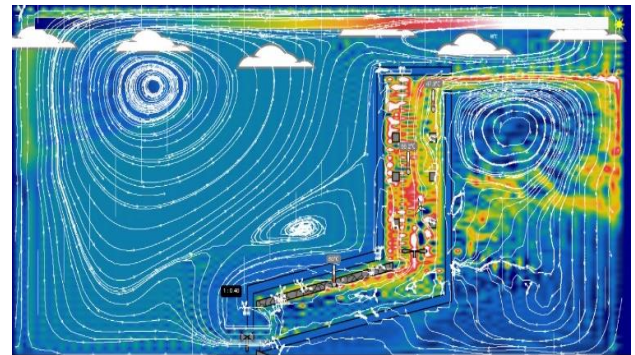


**Figura 6** Deshidratador solar híbrido

## Resultados y discusión

Para la caracterización del sistema se llevaron a cabo varias pruebas, tanto teóricas o prácticas. Las pruebas teóricas fueron realizadas en base a el diseño final, teniendo en cuenta las propiedades térmicas y ópticas de los materiales utilizados, como el vidrio, el aislante térmico o la lámina galvanizada. Todo esto con el fin de poder utilizar un modelo matemático para poder predecir el comportamiento ideal del deshidratador.

En la Fig. 7 se muestra una simulación del deshidratador realizada en el software Energy2D. La cual tiene en cuenta las propiedades físicas de los materiales, las dimensiones reales del prototipo, así como también son incluidas las condiciones climatológicas y atmosféricas de la localidad en la cual se llevaron a cabo las pruebas.

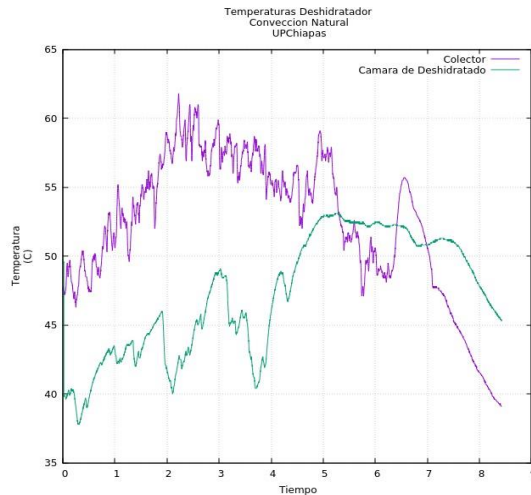


**Figura 7** Simulación del funcionamiento del deshidratador

De forma simultánea se realizaron mediciones de las temperaturas presentadas dentro del deshidratador, en la cámara de deshidratado como en el área del colector. Eso con el fin de poder observar el comportamiento de la temperatura en las diferentes secciones del prototipo a lo largo de un periodo de 9 horas. Las pruebas realizadas al deshidratador se realizaron teniendo en su interior 10 kg de plátano.

En la Fig. 8 se presenta un gráfico en el cual se encuentra el comportamiento de la temperatura a través del periodo de tiempo de prueba. En este se puede apreciar el efecto que tiene la implementación de un sistema de almacenamiento al pasar las horas pico de radiación.

Así como también es la variación de las temperaturas en las dos secciones caracterizadas del prototipo.



**Figura 8** Variación de temperatura en el deshidratador y cámara de deshidratado respecto al tiempo

## Conclusión

El secado de frutas permite la disminución del desperdicio en los alimentos. En el caso del plátano, cuando es deshidratado estando en una etapa de madurez, se obtienen un producto de buena apariencia. Las características de madurez, así como el pretratamiento en la preparación del producto antes del proceso son factores importantes que contribuirán en la calidad del producto final. La temperatura es un factor que afecta directamente a la calidad del plátano deshidratado, dándole apariencia poco agradable.

La simulación térmica nos arroja datos los cuales no son alcanzados por las mediciones experimentales realizadas en las pruebas, sin embargo, las mediciones experimentales presentan una tendencia al comportamiento predicho por la simulación, lo que indica que los principios físicos con los que fue diseñado son apropiados para el correcto funcionamiento.

Dejando además un margen de mejora en la manufactura del prototipo, así como en la calidad de los materiales, acciones que de ser tomadas pueden mejorar en gran manera la eficiencia del sistema y por ende las temperaturas, así como el tiempo que temperaturas altas pueden ser mantenidas por el sistema. En cuanto al sistema de almacenamiento pasivo de temperatura, este mostro ser de utilidad en la Fig. 8, esto se concluye del aumento de temperatura que se presenta en la cámara de deshidratado que ocurre de manera simultánea a la caída de la radiación solar, ya que la energía almacena es liberada en los momentos que la radiación solar decae.

De esta forma extendiendo alrededor de 2 horas el tiempo de secado después de las horas de mayor radiación. Las pruebas llevadas a cabo de forma experimental presentaron picos de hasta 65 °C lo que supera las temperaturas pico de la simulación, esto se atribuye a la inyección de calor de la resistencia eléctrica, la cual permite al sistema llegar a temperaturas las cuales usualmente no alcanzaría.

El conjunto de los sistemas de ganancia de calor (almacenamiento pasivo y resistencia eléctrica) y el sistema de medición y control otorgan al sistema la capacidad de poder alcanzar las temperaturas necesarias para poder llevar a cabo de forma adecuada el proceso de deshidratado de la mayoría de los frutos, así como el poder tener un mayor tiempo útil en el día, extendiendo hasta 2 horas el tiempo de aprovechamiento de la energía solar.

## Referencias

- [1] Idoaldo Sivipaucar, H. C. (s.f.). Cálculo y construcción de un secador solar por conveccion natural
- [2] Luis Eduardo García, M. F. (2012). Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos.
- [3] Venalanzo, R. A. (Octubre de 2017). *Diseño y construcción de un secador solar para frutas*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/323759795\\_diseno\\_y\\_construccion\\_de\\_un\\_secador\\_solar\\_para\\_frutas](https://www.researchgate.net/publication/323759795_diseno_y_construccion_de_un_secador_solar_para_frutas)
- [4] Brenan, J.G., (1980). Las operaciones de la ingeniería de los alimentos, vol. 2, 200.
- [5] Molano C., Linda G., (2011). Evaluación Nutricional de la Uvilla ( *Physalis peruviana* L.) Deshidratada, a tres Temperaturas Mediante un Deshidratador de Bandejas, vol. 31.
- [6] Oliver Ramírez, A. (2009). Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios (Doctoral dissertation, Arquitectura).

- [7]Riofrío, A., Vaca, D., Orozco, D. C. M., & Martínez, J. (2014). Análisis del consumo energético en procesos de cocción eficiente para el sector residencial. In *Memorias del Congreso latinoamericano de ingeniería mecánica Colim* (Vol. 8, pp. 268-273).



# Instrucciones para la Publicación Científica, Tecnológica y de Innovación

---

## [Título en Times New Roman y Negritas No. 14 en Español e Inglés]

Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1<sup>er</sup> Autor†\*, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1<sup>er</sup> Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2<sup>do</sup> Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3<sup>er</sup> Coautor

*Institución de Afiliación del Autor incluyendo dependencia (en Times New Roman No.10 y Cursiva)*

International Identification of Science - Technology and Innovation

ID 1<sup>er</sup> Autor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1<sup>er</sup> Autor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 1<sup>er</sup> Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 1<sup>er</sup> Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 2<sup>do</sup> Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 2<sup>do</sup> Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

ID 3<sup>er</sup> Coautor: (ORC ID - Researcher ID Thomson, arXiv Author ID - PubMed Autor ID - Open ID) y CVU 3<sup>er</sup> Coautor: (Becario-PNPC o SNI-CONACYT) (No.10 Times New Roman)

(Indicar Fecha de Envío: Mes, Día, Año); Aceptado (Indicar Fecha de Aceptación: Uso Exclusivo de ECORFAN)

---

### Resumen (En Español, 150-200 palabras)

Objetivos  
Metodología  
Contribución

**Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Español)**

### Resumen (En Inglés, 150-200 palabras)

Objetivos  
Metodología  
Contribución

**Indicar 3 palabras clave en Times New Roman y Negritas No. 10 (En Inglés)**

---

**Citación:** Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Autor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 1er Coautor, Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 2do Coautor y Apellidos (EN MAYUSCULAS), Nombre del 3er Coautor. Título del Artículo. Revista de Sistemas Experimentales. Año 1-1: 1-11 (Times New Roman No. 10)

---

---

\* Correspondencia del Autor (ejemplo@ejemplo.org)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Texto redactado en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

Explicación del tema en general y explicar porque es importante.

¿Cuál es su valor agregado respecto de las demás técnicas?

Enfocar claramente cada una de sus características

Explicar con claridad el problema a solucionar y la hipótesis central.

Explicación de las secciones del Artículo

## Desarrollo de Secciones y Apartados del Artículo con numeración subsecuente

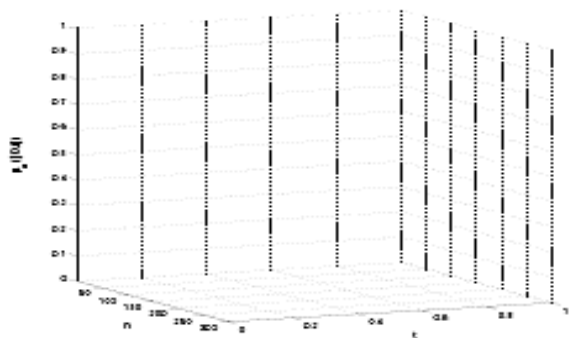
[Título en Times New Roman No.12, espacio sencillo y Negrita]

Desarrollo de Artículos en Times New Roman No.12, espacio sencillo.

## Inclusión de Gráficos, Figuras y Tablas-Editables

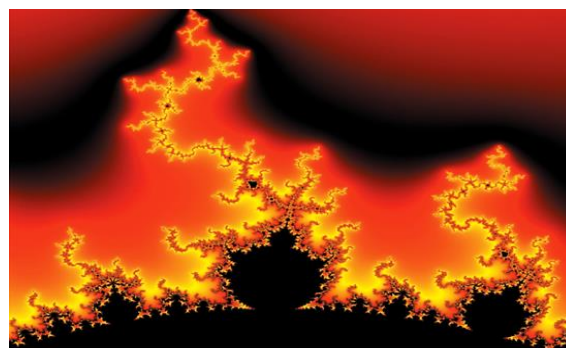
En el *contenido del Artículo* todo gráfico, tabla y figura debe ser editable en formatos que permitan modificar tamaño, tipo y número de letra, a efectos de edición, estas deberán estar en alta calidad, no pixeladas y deben ser notables aun reduciendo la imagen a escala.

[Indicando el título en la parte inferior con Times New Roman No. 10 y Negrita]



**Gráfico 1** Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.



**Figura 1** Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.


**Tabla 1** Titulo y Fuente (*en cursiva*)

No deberán ser imágenes, todo debe ser editable.

Cada Artículo deberá presentar de manera separada en **3 Carpetas**: a) Figuras, b) Gráficos y c) Tablas en formato .JPG, indicando el número en Negrita y el Titulo secuencial.

## Para el uso de Ecuaciones, señalar de la siguiente forma:

$$Y_{ij} = \alpha + \sum_{h=1}^r \beta_h X_{hij} + u_j + e_{ij}$$

(1)

Deberán ser editables y con numeración alineada en el extremo derecho.

## Metodología a desarrollar

Dar el significado de las variables en redacción lineal y es importante la comparación de los criterios usados

## Resultados

Los resultados deberán ser por sección del Artículo.

## Anexos

Tablas y fuentes adecuadas.

## Agradecimiento

Indicar si fueron financiados por alguna Institución, Universidad o Empresa.

## Conclusiones

Explicar con claridad los resultados obtenidos y las posibilidades de mejora.

## Referencias

Utilizar sistema APA. No deben estar numerados, tampoco con viñetas, sin embargo en caso necesario de numerar será porque se hace referencia o mención en alguna parte del Artículo.

Utilizar Alfabeto Romano, todas las referencias que ha utilizado deben estar en el Alfabeto romano, incluso si usted ha citado un Artículo, libro en cualquiera de los idiomas oficiales de la Organización de las Naciones Unidas (Inglés, Francés, Alemán, Chino, Ruso, Portugués, Italiano, Español, Árabe), debe escribir la referencia en escritura romana y no en cualquiera de los idiomas oficiales.

## Ficha Técnica

Cada Artículo deberá presentar un documento Word (.docx):

Nombre de la Revista

Título del Artículo

Abstract

Keywords

Secciones del Artículo, por ejemplo:

1. *Introducción*
2. *Descripción del método*
3. *Análisis a partir de la regresión por curva de demanda*
4. *Resultados*
5. *Agradecimiento*
6. *Conclusiones*
7. *Referencias*

Nombre de Autor (es)

Correo Electrónico de Correspondencia al Autor

Referencias

## Requerimientos de Propiedad Intelectual para su edición:

Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Originalidad del Autor y Coautores

Firma Autógrafa en Color Azul del Formato de Aceptación del Autor y Coautores

## **Reserva a la Política Editorial**

Revista de Sistemas Experimentales se reserva el derecho de hacer los cambios editoriales requeridos para adecuar los Artículos a la Política Editorial del Research Journal. Una vez aceptado el Artículo en su versión final, el Research Journal enviará al autor las pruebas para su revisión. ECORFAN® únicamente aceptará la corrección de erratas y errores u omisiones provenientes del proceso de edición de la revista reservándose en su totalidad los derechos de autor y difusión de contenido. No se aceptarán supresiones, sustituciones o añadidos que alteren la formación del Artículo.

## **Código de Ética – Buenas Prácticas y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales**

### **Declaración de Originalidad y carácter inédito del Artículo, de Autoría, sobre la obtención de datos e interpretación de resultados, Agradecimientos, Conflicto de intereses, Cesión de derechos y distribución**

La Dirección de ECORFAN-México, S.C reivindica a los Autores de Artículos que su contenido debe ser original, inédito y de contenido Científico, Tecnológico y de Innovación para someterlo a evaluación.

Los Autores firmantes del Artículo deben ser los mismos que han contribuido a su concepción, realización y desarrollo, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, su redacción y revisión. El Autor de correspondencia del Artículo propuesto requisitara el formulario que sigue a continuación.

Título del Artículo:

- El envío de un Artículo a Revista de Sistemas Experimentales emana el compromiso del autor de no someterlo de manera simultánea a la consideración de otras publicaciones seriadas para ello deberá complementar el Formato de Originalidad para su Artículo, salvo que sea rechazado por el Comité de Arbitraje, podrá ser retirado.
- Ninguno de los datos presentados en este Artículo ha sido plagiado ó inventado. Los datos originales se distinguen claramente de los ya publicados. Y se tiene conocimiento del testeo en PLAGSCAN si se detecta un nivel de plagio Positivo no se procederá a arbitrar.
- Se citan las referencias en las que se basa la información contenida en el Artículo, así como las teorías y los datos procedentes de otros Artículos previamente publicados.
- Los autores firman el Formato de Autorización para que su Artículo se difunda por los medios que ECORFAN-México, S.C. en su Holding Bolivia considere pertinentes para divulgación y difusión de su Artículo cediendo sus Derechos de Obra.
- Se ha obtenido el consentimiento de quienes han aportado datos no publicados obtenidos mediante comunicación verbal o escrita, y se identifican adecuadamente dicha comunicación y autoría.
- El Autor y Co-Autores que firman este trabajo han participado en su planificación, diseño y ejecución, así como en la interpretación de los resultados. Asimismo, revisaron críticamente el trabajo, aprobaron su versión final y están de acuerdo con su publicación.
- No se ha omitido ninguna firma responsable del trabajo y se satisfacen los criterios de Autoría Científica.
- Los resultados de este Artículo se han interpretado objetivamente. Cualquier resultado contrario al punto de vista de quienes firman se expone y discute en el Artículo.

## Copyright y Acceso

La publicación de este Artículo supone la cesión del copyright a ECORFAN-Mexico, S.C en su Holding Bolivia para su Revista de Sistemas Experimentales, que se reserva el derecho a distribuir en la Web la versión publicada del Artículo y la puesta a disposición del Artículo en este formato supone para sus Autores el cumplimiento de lo establecido en la Ley de Ciencia y Tecnología de los Estados Unidos Mexicanos, en lo relativo a la obligatoriedad de permitir el acceso a los resultados de Investigaciones Científicas.

Título del Artículo:

Nombre y apellidos del Autor de contacto y de los Coautores	Firma
1.	
2.	
3.	
4.	

## Principios de Ética y Declaratoria de Solución a Conflictos Editoriales

### Responsabilidades del Editor

El Editor se compromete a garantizar la confidencialidad del proceso de evaluación, no podrá revelar a los Árbitros la identidad de los Autores, tampoco podrá revelar la identidad de los Árbitros en ningún momento.

El Editor asume la responsabilidad de informar debidamente al Autor la fase del proceso editorial en que se encuentra el texto enviado, así como de las resoluciones del arbitraje a Doble Ciego.

El Editor debe evaluar los manuscritos y su contenido intelectual sin distinción de raza, género, orientación sexual, creencias religiosas, origen étnico, nacionalidad, o la filosofía política de los Autores.

El Editor y su equipo de edición de los Holdings de ECORFAN® no divulgarán ninguna información sobre Artículos enviado a cualquier persona que no sea el Autor correspondiente.

El Editor debe tomar decisiones justas e imparciales y garantizar un proceso de arbitraje por pares justa.

### Responsabilidades del Consejo Editorial

La descripción de los procesos de revisión por pares es dado a conocer por el Consejo Editorial con el fin de que los Autores conozcan cuáles son los criterios de evaluación y estará siempre dispuesto a justificar cualquier controversia en el proceso de evaluación. En caso de Detección de Plagio al Artículo el Comité notifica a los Autores por Violación al Derecho de Autoría Científica, Tecnológica y de Innovación.

### Responsabilidades del Comité Arbitral

Los Árbitros se comprometen a notificar sobre cualquier conducta no ética por parte de los Autores y señalar toda la información que pueda ser motivo para rechazar la publicación de los Artículos. Además, deben comprometerse a mantener de manera confidencial la información relacionada con los Artículos que evalúan.

Cualquier manuscrito recibido para su arbitraje debe ser tratado como documento confidencial, no se debe mostrar o discutir con otros expertos, excepto con autorización del Editor.

Los Árbitros se deben conducir de manera objetiva, toda crítica personal al Autor es inapropiada.

Los Árbitros deben expresar sus puntos de vista con claridad y con argumentos válidos que contribuyan al que hacer Científico, Tecnológica y de Innovación del Autor.

Los Árbitros no deben evaluar los manuscritos en los que tienen conflictos de intereses y que se hayan notificado al Editor antes de someter el Artículo a evaluación.

### **Responsabilidades de los Autores**

Los Autores deben garantizar que sus Artículos son producto de su trabajo original y que los datos han sido obtenidos de manera ética.

Los Autores deben garantizar no han sido previamente publicados o que no estén siendo considerados en otra publicación seriada.

Los Autores deben seguir estrictamente las normas para la publicación de Artículos definidas por el Consejo Editorial.

Los Autores deben considerar que el plagio en todas sus formas constituye una conducta no ética editorial y es inaceptable, en consecuencia, cualquier manuscrito que incurra en plagio será eliminado y no considerado para su publicación.

Los Autores deben citar las publicaciones que han sido influyentes en la naturaleza del Artículo presentado a arbitraje.

### **Servicios de Información**

#### **Indización - Bases y Repositorios**

RESEARCH GATE (Alemania)

GOOGLE SCHOLAR (Índices de citas-Google)

REDIB (Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico- CSIC)

MENDELEY (Gestor de Referencias bibliográficas)

DULCINEA (Revistas científicas españolas)

UNIVERSIA (Biblioteca Universitaria-Madrid)

SHERPA (Universidad de Nottingham- Inglaterra)

#### **Servicios Editoriales**

Identificación de Citación e Índice H

Administración del Formato de Originalidad y Autorización

Testeo de Artículo con PLAGSCAN

Evaluación de Artículo

Emisión de Certificado de Arbitraje

Edición de Artículo

Maquetación Web

Indización y Repositorio

Traducción

Publicación de Obra

Certificado de Obra

Facturación por Servicio de Edición

#### **Política Editorial y Administración**

21 Santa Lucía, CP-5220. Libertadores -Sucre – Bolivia. Tel: +52 1 55 6159 2296, +52 1 55 1260 0355, +52 1 55 6034 9181; Correo electrónico: [contact@ecorfan.org](mailto:contact@ecorfan.org) [www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)

**ECORFAN®**

**Editor en Jefe**

BARRERO-ROSALES, José Luis. PhD

**Directora Ejecutiva**

RAMOS-ESCAMILLA, María. PhD

**Director Editorial**

PERALTA-CASTRO, Enrique. MsC

**Diseñador Web**

ESCAMILLA-BOUCHAN, Imelda. PhD

**Diagramador Web**

LUNA-SOTO, Vladimir. PhD

**Asistente Editorial**

SORIANO-VELASCO, Jesús. BsC

**Traductor**

DÍAZ-OCAMPO, Javier. BsC

**Filóloga**

RAMOS-ARANCIBIA, Alejandra. BsC

**Publicidad y Patrocinio**

(ECORFAN® Bolivia), [sponsorships@ecorfan.org](mailto:sponsorships@ecorfan.org)

**Licencias del Sitio**

03-2010-032610094200-01-Para material impreso, 03-2010-031613323600-01-Para material electrónico, 03-2010-032610105200-01-Para material fotográfico, 03-2010-032610115700-14-Para Compilación de Datos, 04 -2010-031613323600-01-Para su página Web, 19502-Para la Indización Iberoamericana y del Caribe, 20-281 HB9-Para la Indización en América Latina en Ciencias Sociales y Humanidades, 671-Para la Indización en Revistas Científicas Electrónicas España y América Latina, 7045008-Para su divulgación y edición en el Ministerio de Educación y Cultura-España, 25409-Para su repositorio en la Biblioteca Universitaria-Madrid, 16258-Para su indexación en Dialnet, 20589-Para Indización en el Directorio en los países de Iberoamérica y el Caribe, 15048-Para el registro internacional de Congresos y Coloquios. [financingprograms@ecorfan.org](mailto:financingprograms@ecorfan.org)

**Oficinas de Gestión**

21 Santa Lucía, CP-5220. Libertadores -Sucre – Bolivia.

# Revista de Sistemas Experimentales

“Análisis energético de un sistema termoelectrico para el aprovechamiento del calor residual en un motor Turbofan mediante dinámica de fluidos computacional”

**ROJAS-AVILA, Apolo, VALLE-HERNÁNDEZ, Julio, CASTILLO-JIMÉNEZ, Víctor, GALLARDO-VILLAREAL, José Manuel y ALONSO-ALFARO Jorge G.**

*Universidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo*

*Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Escuela Superior de Apan*

“Control Robusto  $\mathcal{H}_\infty$  en forma Global para Robot Manipulador”

**CHÁVEZ-GUZMÁN, Carlos, ESQUEDA-ELIZONDO, José, MERIDA-RUBIO, Jovan y COLORES-VARGAS, Juan Miguel**

*Universidad Autónoma de Baja California*

“Comparaciones ópticas y estructurales de las películas de Óxido de Silicio rico en Silicio (SRO) depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD”

**MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, Haydee Patricia, LUNA-LÓPEZ, José Alberto, LUNA-FLORES, Adán y HERNÁNDEZ-DE LA LUZ, José Álvaro David**

*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*

“Deshidratador solar híbrido para el secado de plátano”

**CAMACHO-MARTINEZ, Humberto Armando, ANTONIO-GORDILLO, Diana Montserrat, ROBLES-OCAMPO, José Billerman y SEVILLA-CAMACHO, Perla Jazmín**

*Universidad Politécnica de Chiapas*

