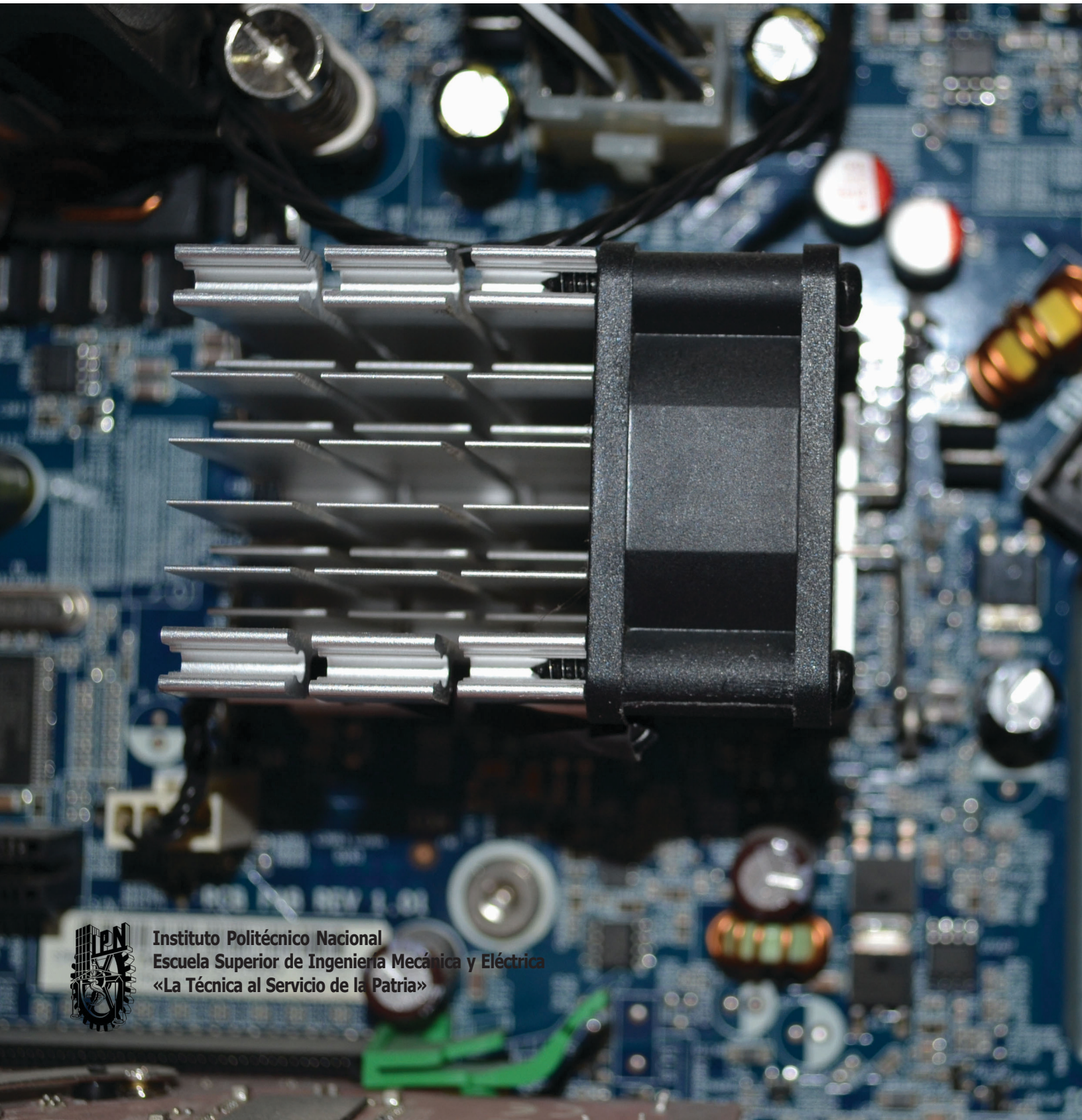
ISSN 1665-0654 [versión impresa]
e-ISSN en trámite [versión electrónica]

Científica

Científica: The Mexican Journal of Electromechanical Engineering · Volumen 21 Número 1 · edición semestral: enero-junio 2017 · México · www.cientifica.esimez.ipn.mx



Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
«La Técnica al Servicio de la Patria»

Instituto Politécnico Nacional
México
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Científica

ISSN 1665-0654
eISSN en trámite

volumen 21, número 1, enero-junio 2017

The Mexican Journal of Electromechanical Engineering

DIRECTORIO

Guillermo Urriolagoitia Calderón
Director

Alma Vicenta Miranda Godínez
Coordinadora Editorial

Cuauhtémoc Jiménez Pérez
Editor Técnico

Luis Alberto Méndez Cruz
Página Web

Indizada en:

Latindex: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.
www.latindex.org

Periódica:
Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias.
www.dgbiblio.unam.mx

Redalyc: Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.
www.redalyc.org

Publindex:
Índice Bibliográfico Nacional Revistas Científicas Homologadas del Colciencias.
http://scienti.colciencias.gov.co:8084/publindex/

Contenido

Biomodelado de los componentes del oído medio humano haciendo uso de imágenes de resonancia magnética
Biomodeling of Components of the Human Middle Ear Using Magnetic Resonance Imaging
Adolfo **López-Liévano**, Daniel Ramón **López-Liévano**, Hernando Efraín **Caicedo-Ortiz**, Alejandro **González-Rebattú**, Mauricio **González-Rebattú** | **México - Colombia** 3-8

Estimación del desgaste volumétrico de componentes tribológicos lubricados, mediante la aplicación combinada de modelos de cuantificación de partículas de desgaste
Volumetric Wear Estimation of Lubricated Tribological Components by Means of Combining Analytical Models for Wear Prediction
Yamile **Lara** | **Venezuela** 9-16

Generalidades de estrategias de control en aerogeneradores de transmisión directa
Issues on Control of Direct-Drive Wind Turbine Generator
Luz Yazmín **Villagrán-Villegas**, Isaura Victoria **Hernández-Rodríguez**, Juan Carlos **Anzelmetti-Zaragoza**, Alejandro **Marquina-Chávez**, Celia María **Calderón-Ramón**
México 17-24

mHealth indispensable para la salud de los mexicanos
mHealth Essential for the Health of Mexicans
José Rodrigo **Espinoza-Bautista**, Salvador **Álvarez-Ballesteros**, Mario **Romero-Castro** | **México** 25-34

Análisis de envejecimiento de los pernos de cierre de la tapa de una vasija de un reactor nuclear tipo BWR
Aging Analysis of the Stud Bolts of the Closure Head of a BWR Nuclear Reactor Vessel
Gilberto **Soto-Mendoza**, Juan **Cruz-Castro**, Alejandra **Armenta-Molina**, Luis Héctor **Hernández-Gómez**, Pablo **Ruiz-López,** Noel **Moreno-Cuahquentzi**, Alejandro **Luna-Áviles** | **México** 35-41

Do Intergalactic Photons Attract or Repel Each Other?
¿Los fotones intergalácticos se atraen o se repelen?
Héctor **Torres-Silva**, Altair **Souza-de-Assis** | **Chile - Brasil** 43-48

Construction of a Homogeneous Magnetic Field for Orthopedic Applications
Construcción de un campo magnético homogéneo para aplicaciones ortopédicas
Pedro A. **Lomelí-Mejía**, Alfredo **Tejeda-Buenosaires**, José **Alanís-Carbajal** | **México** 49-54

Aplicación de la teoría del costo exergético para el análisis de un sistema de refrigeración con subenfriamiento por un enfriador termoeléctrico
Application of Exergetic Cost Theory to Analyze a Refrigeration System with Subcooling by a Thermoelectric Cooler
Ignacio **Carvajal-Mariscal**, Pedro **Quinto-Diez**, José Eduardo **Flores-Ortega**, Román **Bravo-Cadena**, César Augusto **Real-Ramírez**, Eliseo **Martínez-Espinosa** | **México** 55-62

Comité Editorial

Guillermo Urriolagoitia Calderón
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Alexander Balankin
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Jesús del Castillo
Instituto Venezolano de Investigación Científica (VENEZUELA)

María Teresa Alonso Rasgado
University of Manchester (REINO UNIDO)

Manuel Elices Calafat
Universidad Politécnica de Madrid (ESPAÑA)

Marco Ceccarelli
University of Cassino (ITALIA)

Héctor Pérez Meana
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Jinhui Shao
University of Shuo (JAPÓN)

Editores Asociados

Apolinar Reinoso Hernández
Centro de Investigación y de Estudios Superiores de Ensenada (MÉXICO)

Baltasar Mena Inesta
Universidad Nacional Autónoma de México (MÉXICO)

Édgar Sánchez Sinencio
Texas A&M University College Station (ESTADOS UNIDOS)

Francisco Sánchez Sesma
Universidad Nacional Autónoma de México (MÉXICO)

Garret Sautis
University de Shieffield (REINO UNIDO)

Guillermo Urriolagoitia Sosa
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Hidilberto Jardón Aguilar
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados (MÉXICO)

Israel Sauceda Meza
Universidad de Baja California (MÉXICO)

Joaquín Fernández Valdivia
Universidad de Sevilla (ESPAÑA)

Jorge Sosa Pedroza
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

José de Jesús Álvarez Ramírez
Universidad Autónoma Metropolitana (MÉXICO)

José Luis del Río Correa
Universidad Autónoma Metropolitana (MÉXICO)

José Manuel de la Rosa
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Juan Alfonso Beltrán Fernández
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Luis Héctor Hernández Gómez
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Luis Niño de Rivera y Oyarzábal
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Mariko Nakano Miyatake
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Manuel A. Duarte Marmoud
Universidad de Chile (CHILE)

Michael Shapiro Fihman
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados (MÉXICO)

Miguel Ángel Rodríguez Díaz
Instituto de Física de Cantabria (ESPAÑA)

Miguel Castro Fernández
Centro de Investigación y Pruebas Electromagnéticas de Cuba (CUBA)

Miguel Cruz Irisson
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Pablo Rogelio Hernández Rodríguez
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados (MÉXICO)

Patricia Camarena Gallardo
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Rafael Castro Linares
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados (MÉXICO)

Régulo López Callejas
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (MÉXICO)

Valery Kontorovich
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados (MÉXICO)

Víctor Champac Vilela
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (MÉXICO)

Victor Kravchenko
Moscow Institute of Physics and Technology (FEDERACIÓN RUSA)

Vladislav Kravchenko
Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados Querétaro (MÉXICO)

Volodymir Ponomaryov
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Científica

ISSN 1665-0654
eISSN en trámite

volumen 21, número 1, enero-junio 2017

La Revista Mexicana de Ingeniería Electromecánica

The Mexican Journal of Electromechanical Engineering

Científica, Volumen 21, Número 1, enero-junio de 2017, es una revista semestral editada por el Instituto Politécnico Nacional a través de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Delegación Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México, Tel. +52 55 5729 6000 ext. 54518, www.cientifica.esimez.ipn.mx, revistacientifipn@yahoo.com.mx. Editor responsable: Guillermo Urriolagoitia Calderón. [Versión impresa: Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2015-112516365800-102, ISSN 1665-0654, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor, Licitud de Título No. 10962, Licitud de Contenido No. 7611, otorgados por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación] [Versión electrónica: eISSN en trámite, Reserva de Derechos al Uso Exclusivo en trámite]. Este número se terminó de imprimir el 17 de diciembre de 2016. Tiraje: 200 ejemplares.
Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Esta es una obra intelectual protegida por la Ley Federal del Derecho de Autor, puede ser reproducida con fines no lucrativos, siempre y cuando se cite la fuente completa; su uso para otros fines, requiere autorización previa y por escrito de la Dirección General del Instituto Politécnico Nacional.

EDITORIAL

Científica, en su primer número del volumen 21, publica artículos de investigación que cubren las disciplinas que le competen y le invita a consultar los artículos y números completos en línea en su página electrónica www.cientifica.esimez.ipn.mx.

En el primer trabajo, se realiza el biomodelado de los elementos que componen el oído medio, el cual incluye el sistema tímpano-cadena oscicular (martillo, yunque y estribo) así como los ligamentos: anterior maleal, superior maleal e incudal posterior y, por último, las juntas o articulaciones incudomaleal e incudo-estapedial. El biomodelo se valida con datos geométricos de trabajos publicados en la literatura abierta. A este respecto, se constató que el presente modelo tiene una variación de alrededor del 21% respecto a los datos consultados en la literatura; sin embargo, se sabe que la anatomía del oído humano varía de acuerdo al género, al fenotipo y a la edad. En conclusión, este trabajo aporta un modelo del oído medio bastante fiel, que sirve como la base para modelar diferentes patologías con relativa facilidad, aportando así información vital al campo de la medicina.

Se presenta un estudio, en el segundo artículo, que combina los modelos propuestos por Espinoza, Macian *et al*., e Iwai, los cuales plantean aproximaciones analíticas entre el desgaste de las máquinas y la concentración de las partículas contaminantes presentes en el aceite que las lubrica. Para esto, se realizó un estudio experimental de desgaste por deslizamiento de piezas de metal, en diferentes condiciones de operación, con una máquina tribológica, la cual posee una parte dinámica (cilindros de desgaste) y una parte estática (cojinetes de contacto deslizante). La contaminación del lubricante se midió con un espectrómetro de emisión atómica y un contador de partículas. Se concluye, que los modelos de cuantificación de desgaste propuestos, por sí solos, presentan diferencias significativas, entre un 50% y 80%, con respecto al valor de desgaste que se quiere medir, sin embargo con los datos experimentales obtenidos y la aplicación combinada de estos modelos es posible minimizar el error relativo porcentual en un 20 y 30%.

Este tercer artículo proporciona un punto de vista general de las estrategias de control empleadas en aerogeneradores de transmisión directa. Actualmente, la literatura técnica está enfocada en control de aerogeneradores de imanes permanentes (PMSG) y es escasa en aerogeneradores de rotor bobinado (WRSG). En este trabajo se concluye que debido a las ventajas técnicas, económicas y ecológicas es importante desarrollar estrategias de control para aerogeneradores con generadores sincrónicos eléctricamente excitados y mostrar algunos resultados del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) con modelos de generador de rotor devanado donde este tipo de modelo se puede utilizar en modelos de transmisión directa.

El término mHealth emergió como una rama importante de eHealth para la atención médica a distancia mediante dispositivos móviles. Lo anterior nos lleva a pensar que mHeatlh puede ser una alternativa de salud en México, por ello urge que grupos, tanto de las áreas Medico-Biológicas, como de las áreas de Ingeniería se interesen en crear equipos de trabajo para desarrollar tecnología propia que ayude a mejorar el sector salud de México para beneficiar a la población. Por ello el objetivo de este cuarto trabajo publicado es analizar los campos de acción dentro del sistema de salud mexicano y de esta manera realizar propuestas para la implementación de eHealth y mHealth en México.

En el proceso de renovación de la licencia operativa de una central nuclear, se tiene que determinar que los diversos componentes que están relacionados con la seguridad que continúen operando sin ningún problema durante el período de extensión solicitado. En este quinto trabajo, se presenta el análisis de envejecimiento de los pernos de cierre de la tapa de una vasija de un reactor nuclear tipo BWR. Para este efecto, la evaluación se compone de dos partes: un programa de gestión del envejecimiento y un análisis de envejecimiento de tiempo limitado. Los casos, que fueron considerados para determinar el daño acumulado de los pernos, son: precarga, prueba hidrostática, arranque, funcionamiento estable y apagado. Utilizando el método del elemento finito y siguiendo el procedimiento del código ASME Sección III, se obtiene el daño acumulado por fatiga proyectado para 60 años: 0.2458. Esto demuestra que se operará sin problemas y se satisfacen los criterios de aceptación señalados en el documento.

A través de un modelo simple en este artículo, estudiamos la posibilidad de fotones con masa y carga que pueden producir una fuerza atractiva o repulsiva a distancias galácticas. La fuente principal de la masa oscura puede ser proporcionada por la masa del fotón durante el periodo de radiación del Universo. Un simple análisis muestra que la masa de fotones del orden de mg ~ 10-34 eV es coherente con las observaciones actuales. Esta magnitud es menor que el límite más riguroso de la masa de fotones disponible hasta ahora, que es del orden de mg ~ 10-27 eV. Además, se revisa la ecuación de desplazamiento del rojo para un par de fotones que muestra que esta ecuación obtenida con este modelo simple se puede comparar con el resultado obtenido de la relatividad especial generalizada. Este enfoque puede ser importante para corregir distancias y tiempos en señales de GPS de naves espaciales muy lejos del planeta Tierra.

La aplicación de campos magnéticos es diversa, en muchos campos del cuidado de la salud, debido a su efecto sistémico. En particular en ortopedia, es posible lograr la estimulación de la consolidación ósea. Pero lograr un campo magnético uniforme en una área útil y, además, estable no es fácil. Para obtener el campo magnético, se diseñó un arreglo de bobinas Helmholtz. Se presenta el desarrollo teórico de las mismas y, además, se dispone del programa VIZIMAG para conocer la distribución de las líneas de campo, de forma gráfica.

En este último trabajo de ete fascículo, se presentan los resultados del análisis termoeconómico realizado a un sistema de refrigeración por compresión de vapor con una capacidad de 1 tonelada de refrigeración, al que se le ha instalado un enfriador termoeléctrico para subenfriar el refrigerante a la salida del condensador. Se estudiaron dos condiciones de subenfriamiento. Los resultados experimentales mostraron que al instalar el enfriador termoeléctrico aumenta el efecto refrigerante del sistema sin requerir mayor trabajo por parte del compresor, lo que incrementa el coeficiente de desempeño (COP) del sistema de refrigeración. Se concluye que es recomendable subenfriar el refrigerante con un enfriador termoeléctrico solo en caso que para la alimentación de este dispositivo se aproveche alguna fuente alterna de energía que no implique un costo extra.

Científica agradece su preferencia y le invita a someter sus aportaciones a dictaminación en las áreas de la ingeniería que difunde: ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica, ingeniería electrónica, ingeniería en telecomunicaciones, ingeniería en sistemas y temas sobre educación en ingeniería.

Científica, vol. 21, núm. 1, pp. 3-8, enero-junio 2017.
eISSN en trámite, ISSN 1665-0654, ESIME Instituto Politécnico Nacional México

Biomodelado de los componentes del oído medio humano haciendo uso de imágenes de resonancia magnética

Adolfo **López-Liévano**[1]
Daniel Ramón **López-Liévano**[1]
Hernando Efraín **Caicedo-Ortiz**[2]
Alejandro **González-Rebattú**[3]
Mauricio **González-Rebattú**[3]

[1]Universidad Veracruzana
Facultad de Ciencias Químicas.
Av. Universidad km 7.5, Coatzacoalcos,
CP 96538, Veracruz.
MÉXICO.
[2]Corporación Universitaria Autónoma del Cauca
Facultad de Ingeniería.
Calle 5 núm. 3-85, CP 190009, Popayán.
COLOMBIA.
[3]Instituto de Seguridad y Servicios Sociales
de los Trabajadores del Estado
Hospital Regional "1° de Octubre".
Av. Instituto Politécnico Nacional 1669,
Col. Lindavista, CP 07300, Ciudad de México.
MÉXICO.

correo electrónico (email): k_lievano@hotmail.com
danielopez@uv.mx
hecaicedo@gmail.com

Recibido 02-06-2016, aceptado 27-10-2016.

Resumen

En este trabajo se realiza el biomodelado de los elementos que componen el oído medio, el cual incluye el sistema tímpano-cadena oscicular (martillo, yunque y estribo) así como los ligamentos: anterior maleal, superior maleal e incudal posterior y, por último, las juntas o articulaciones incudomaleal e incudo-estapedial. Un aspecto de suma importancia en cuanto al desarrollo de modelos en elementos finitos, es sin duda, la exactitud de la geometría que se pretenda analizar respecto al modelo real, más aun si se trata de modelar los diferentes mecanismos y partes del cuerpo humano; es por tal motivo que en este trabajo se realiza una metodología de biomodelado, el cual toma como punto de partida la obtención de imágenes de una resonancia magnética del oído medio, posteriormente, por medio de diferentes softwares de diseño (Solidworks), así como de reconstrucción de imágenes (IrfanView, ScanIP) se genera el modelo solido virtual y, también, se aplican filtros para refinar o eliminar imperfecciones propias del biomodelado. Por último, el biomodelo se valida con datos geométricos de trabajos publicados en la literatura abierta. A este respecto, se constató que el presente modelo tiene una variación de alrededor del 21% respecto a los datos consultados en la literatura; sin embargo, se sabe que la anatomía del oído humano varía de acuerdo al género, al fenotipo y a la edad. En conclusión, este trabajo aporta un modelo del oído medio bastante fiel, que sirve como la base para modelar diferentes patologías con relativa facilidad, aportando así información vital al campo de la medicina.

Palabras clave: oído medio, huesillos, elemento finito, tímpano.

Abstract (Biomodeling of Components of the Human Middle Ear Using Magnetic Resonance Imaging)

In this work the biomodelation of the elements that compose the middle ear is performed, which includes the tympanum-oscicular chain (Malleus, Incus and Stape) as well as the ligaments: anterior maleal, superior maleal and posterior incudal; And finally, the incudomaleal and incudo-stapedial joints. A very important point in the development of finite element models, is undoubtedly the accuracy of the geometry to be analyzed with respect to the actual model, even more if it is about modeling of the different mechanisms and parts of the human body; it is for that reason that in this work a methodology of biomodeling is realized, which takes as a starting point, magnetic resonance imaging of the middle ear, subsequently, by means of different design programs (SolidWorks), as well as reconstruction of images (IrfanView, ScanIP) the virtual solid model is generated, and filters are also applied to refine or eliminate imperfections of the biomodeling. Finally, the model is validated with geometric data published in the open literature. In this respect, it is verified that the present model has a variation of about 21% with respect to the data consulted in the literature; however, it is known that the anatomy of the human ear varies according to gender, phenotype and age. In conclusion, this work provides a very precise middle ear model, which serves as the basis for modeling different pathologies with relative ease, and which provides vital information to the field of medicine.

Index terms: middle ear, tympanic membrane, finite element.

1. Introducción

Los osículos auditivos (martillo, yunque y estribo) y la membrana timpánica es el sistema mecánico, que es responsable de la transmisión de sonido desde el exterior hasta el oído interno. El proceso de audición comienza en la membrana timpánica, que recibe el ruido de fuera y esto hace que la membrana vibre, estas vibraciones se transmiten a través de los huesecillos, martillo, yunque y estribo. El último es responsable de la transferencia de las vibraciones a la ventana oval del oído interno (véase Fig. 1).

La creación de un modelo 3D preciso del oído medio, es crítico para la comprensión de su funcionamiento y su comportamiento biomecánico debido a que su geometría es de dimensiones muy pequeñas. Por ejemplo, el estribo es el hueso más pequeño del cuerpo humano: su longitud es de menos de 3 mm y su peso es aproximadamente de 2 y 3 mg (Tae-Soo A y col).

En este sentido, trabajos similares se han desarrollado, tal es el caso de Rolando Ruíz Muñoz [1], que realizó el diseño de prótesis personalizada de cadera para paciente con coxartrosis unilateral, en el que se valió de tomografías axiales computarizadas de un paciente para construir el modelo mediantes herramientas computacionales. Por otra parte, Espinal Gutiérrez [2] llevó a cabo la evaluación biomecánica de la integridad estructural en dientes molares, en donde de igual manera utilizó tomografías computarizadas para realizar el parametrizado de su modelo numérico, y sobre esta línea también se pueden encontrar los trabajos de Camacho *et al*. [3], Martínez *et al*. [4], Beltrán *et al*. [5], Hernández *et al*. [6], Urriolagoitia *et al*. [7], Campos *et al*. [8], Rangel *et al*. [9], así como Moreno Garibaldi [10].

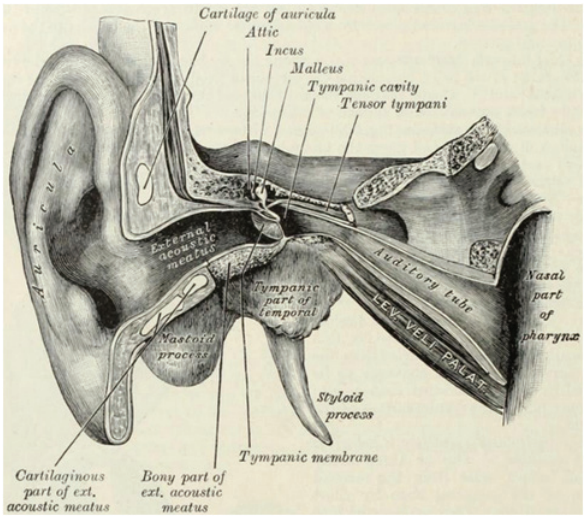


Fig. 1. Estructura del oído medio humano (Warren & Gray, 1918; en [1]).

2. Desarrollo y campo teórico

2.1. Imagen de resonancia magnética (RM)

La resonancia magnética es un método comúnmente utilizado para producir imágenes seccionales en seres humanos para el diagnóstico de problemas médicos. Se basa en la detección y el análisis de energía de resonancia magnética a partir de puntos específicos en un volumen de tejido y la posterior construcción de imágenes en escala de grises. Las imágenes digitales de elementos de imagen en 2D se denominan píxeles; en la RM, donde son tratados pequeños volúmenes, los píxeles tienen tres dimensiones y se llaman *voxels*. Cuando se ve en una pantalla de ordenador aparecen como píxeles en 2D, pero su naturaleza 3D puede ser fácilmente apreciada cuando se reconstruye el volumen en planos diferentes, es aquí donde recae la utilidad del programa ScanIP, pues se ayuda de los voxels para modelar los elementos en 3D (véase Fig. 2).

El proceso de biomodelado del oído medio comienza por la obtención de imágenes de una resonancia magnética de un cadáver humano, que fue facilitada por los doctores O.W. Henson, Jr. y Miriam Henson de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. Es necesario descompactar la resonancia magnética en un formato compatible, para lo cual se ocupó el software IrfanView 4.0, que es de licencia libre. El formato elegido fue JPG, y el proceso de diseño del modelo comienza por importar las imágenes de resonancia magnética en el programa ScanIP, como se ilustra en la Fig. 2.

2.2. Parametrización del modelo

Una vez integrada en el programa ScanIP las imágenes de la resonancia, es importante especificar las dimensiones del

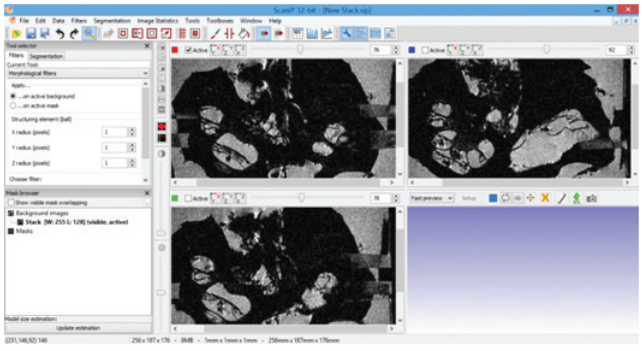


Fig. 2. Importación de las imágenes de resonancia magnética en el programa ScanIP.

volumen de la misma en las tres direcciones *x*, *y*, *z*. En este sentido la resonancia magnética que se utilizó en este trabajo contiene 340 cortes, con una resolución de 489 pixeles de ancho y 366 píxeles de largo. Una vez especificada esta información, el programa será capaz de reproducir la resonancia magnética dentro de su interfaz y así poder comenzar la generación del modelo en 3 dimensiones.

La metodología de creación del modelo en 3 dimensiones consiste en la creación de los elementos que componen el oído medio y que a continuación se enuncian. La forma más conveniente de trabajar en el programa ScanIP es en capas, es decir, construir el oído medio en sus elementos separados y en diferentes capas de colores, para después exportarlos al programa de elemento finito y ensamblarlo, asignando los correspondientes tipos de contactos, lo cual se describe a continuación.

2.3. Metodología para la obtención del modelo en 3D

A continuación, se enuncian los elementos que componen al oído medio y que son modelados por medio del programa ScanIP:

- Canal auditivo
- Anillo timpánico
- Tímpano (pars flácida)
- Tímpano (pars tensa)
- Martillo
- Junta incudomaleal
- Yunque
- Junta incudo estapedal
- Estribo
- Ligamento superior maleal
- Ligamento anterior maleal
- Ligamento posterior incudal

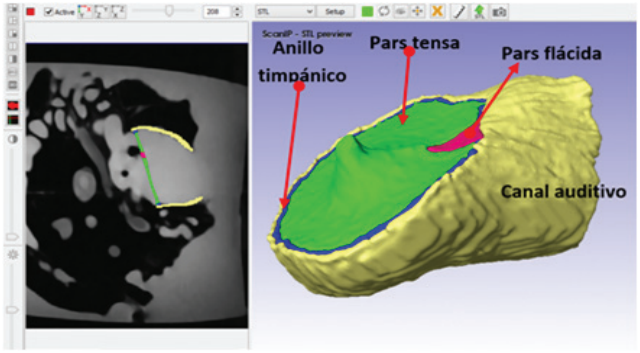


Fig. 3. Ilustración del canal auditivo, anillo timpánico y el tímpano (pars flácida y pars tensa).

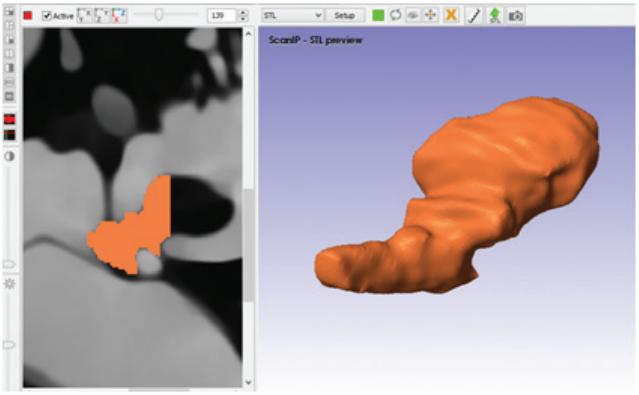


Fig. 4. Construcción del martillo en el programa ScanIP.

En la Fig. 3 se muestra la construcción del canal auditivo. Es importante señalar que debido a las características de la resonancia magnética, solo se construyó la mitad del canal auditivo aproximadamente. Para reconstruir la forma del canal auditivo se utilizó la herramienta Confidence, ya que la tonalidad de blancos del área del canal auditivo estaba muy bien definida; también se utilizó la herramienta Paint para refinar las capas más oscuras que fueron capturadas por la herramienta Confidence. En la Fig. 4 se puede observar la construcción del martillo.

En la Fig. 5 se puede apreciar el modelado de la junta incudomaleal. Dicha junta, que funciona como articulación, es de suma importancia, ya que tiene propiedades mecánicas diferentes a la de los huesos y, al no ser un elemento rígido, es importante asignar de manera adecuada el tipo de contacto unión entre la junta y los huesos que une.

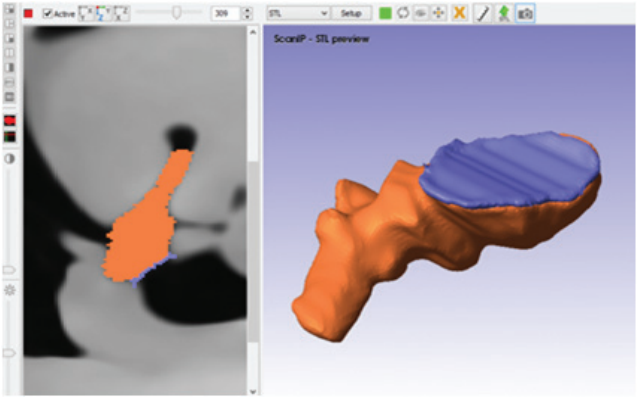


Fig. 5. Construcción de la junta incudomaleal en ScanIP.

En las figuras 6, 7 y 8 se puede apreciar la construcción del Yunque, junta incudo-estapedial así como el estribo, respectivamente.

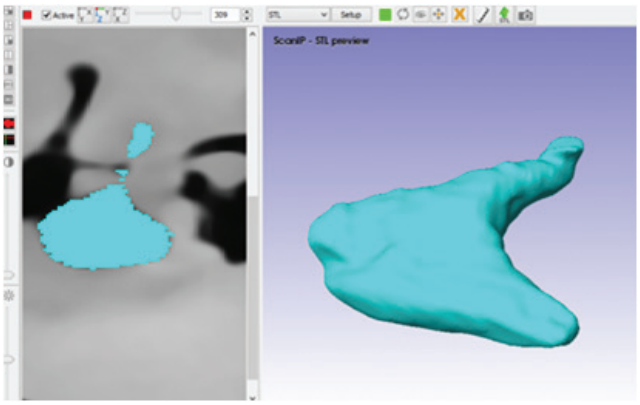


Fig. 6. Construcción del martillo en el programa ScanIP.

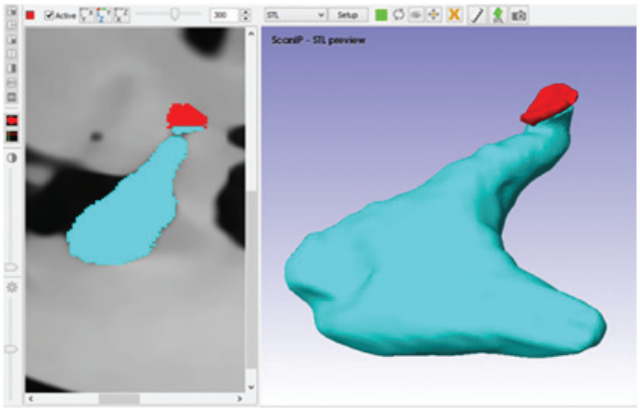


Fig. 7. Construcción de la junta incudoestapedal en el programa ScanIP.

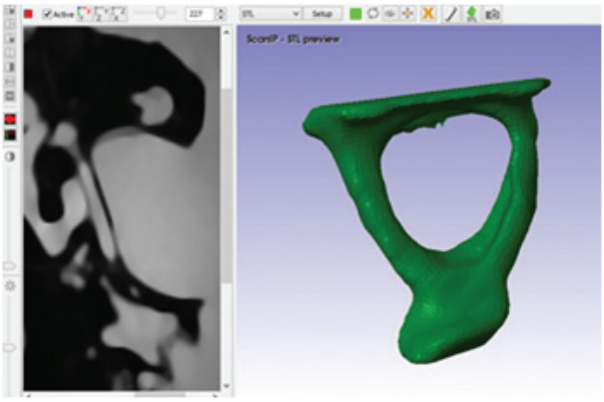


Fig. 8. Construcción del estribo en el programa ScanIP.

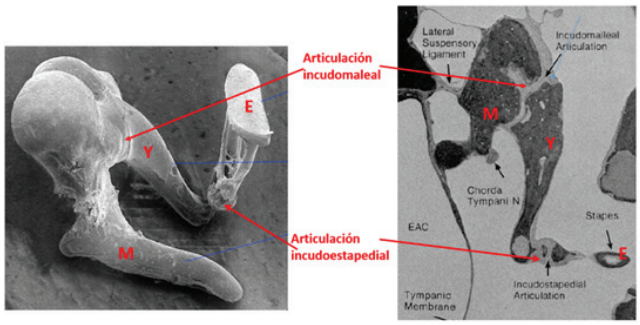
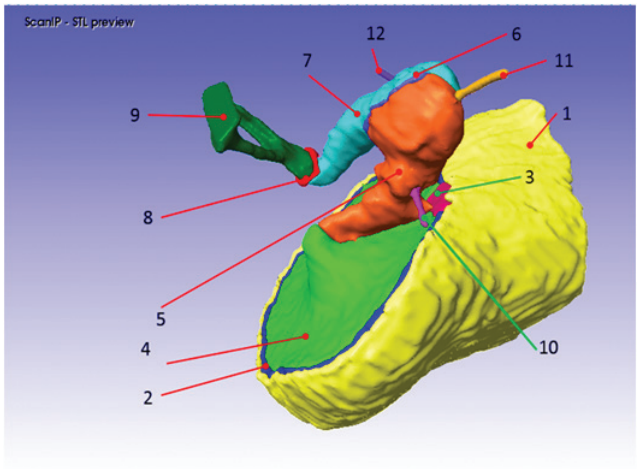


Fig. 9. Vista microscópica de los huesos del oído medio [11].

2.4. Ensamble de todos los elementos del oído medio

En la figura 9 y 10, se muestra una comparativa de imágenes entre los huesos de un oído medio real, vistos a nivel microscópico y la imagen del oído medio del presente trabajo.



Número	Elemento
1	Canal auditivo
2	Anillo timpánico
3	Tímpano (pars flácida)
4	Tímpano (pars tensa)
5	Martillo
6	Junta incudomalear
7	Yunque
8	Junta incudoestapedal
9	Estribo
10	Ligamento anterior malear
11	Ligamento superior malear
12	Ligamento posterior icudal

Fig. 10. Modelo definitivo del oído medio en ScanIP.

Por último, para darle mayor validez al modelo, se realizó una comparativa de las dimensiones del presente modelo y de datos publicados en la literatura.

Como se puede observar en la tabla, el diámetro perpendicular del manubrio, en la región del tímpano, el presente modelo tiene una mayor dimensión en un 21%, lo cual se debe a las diferencias entre individuos de diferentes tipos de género, edad, así como del fenotipo [12].

Tabla 1. Comparativa de las dimensiones geométricas del modelo respecto a la literatura.

	Presente modelo	Literatura	Diferencia	Referencia
Tímpano				
Diámetro a lo largo del manubrio	9.93 mm	8.0-10.0 mm	0 mm	Gray 1918
Diámetro perpendicular al manubrio	10.98 mm	7.5-9.0 mm	1.9 mm	Helmholtz 1863
Martillo				
Longitud a lo largo del manubrio	4.18 mm	5.8 mm	1.62 mm	Stuhlman 1937
Tamaño total	6.97 mm	7.6-9.1 mm	0 mm	Bast & Anson 1949
Yunque				
Longitud proceso largo	7.8 mm	7.0 mm	0.8 mm	Stuhlman 1937
Longitud proceso corto	6.8 mm	5.0 mm	1.8 mm	Stuhlman 1937
Estribo				
Tamaño	4.27 mm	2.5-4.0 mm	0.27 mm	Stuhlman 1937 Wever 1954
Longitud a lo largo de la base del estribo	3.81 mm	2.64-3.36 mm	0.45 mm	Wever 1954
Ancho de la base del estribo	1.33 mm	0.70-1.66 mm	0 mm	Helmholtz 1863

3. Conclusiones

Al término del presente trabajo se puede concluir lo siguiente:

- Se logró generar un modelo con alto grado de precisión geométrica, a partir de técnicas de reconstrucción de imágenes.
- Se pudo validar el modelo a partir de los datos publicados en la literatura.
- A partir de la construcción de un modelo fiel del oído medio, es posible generar un modelo por medio del elemento finito para análisis numéricos de diferentes fenómenos mecánico-acústicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Referencias

[1] Y. Espinal Gutiérrez, "Evaluación biomecánica de la integridad estructural en dientes molares," Tesis de Maestría, Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2011 .

[2] N. Camacho, J. A. Beltrán, M. González, L. H. Hernández P. Moreno, G. Urriolagoitia, & D. López, "Numerical study in biomodels of maxillofacial prosthesis (Cancer and osteonecrosis cases). Design and Computation of Modern Engineering Materials," en *Design and Computation of Modern Engineering Materials,* A. Öchsner y H. Altenbach (Eds.), pp. 59-72, Springer International Publishing, Suiza, 2014.

[3] J. Martínez, J. A. Beltrán, M. González, L. H. Hernández, & A. I. Rangel, "Reconstrucción de fosa ocular con prótesis de hidroxiapatita y malla de titanio," *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 6, núm 1, pp. 53-60, agosto 2014.

[4] J. A. Beltrán, D. López, L. H. Hernández, G. Urriolagoitia, & M. González,"Numerical and biomechanical testings in cadaveric auditory ossicles using computer axial tomography," En *Applications of Computational Tools in Biosciences and Medical Engineering*, A. Öchsner y H. Altenbach (Eds.), pp. 61-71, Springer International Publishing, Suiza, 2014.

[5] L. H. Hernández, D. López, J. A. Beltrán, M. González, G. Urriolagoitia, R. Rodríguez, & N. Camacho, "Design and Manufacture of a Prototype of a Testing Rig for the

Evaluation of the Biomechanical Behavior of Vertebrae," en *Design and Computation of Modern Engineering Materials,* A. Öchsner y H. Altenbach (Eds.), pp. 121-134, Springer International Publishing, Suiza, 2014.

[6] G. Urriolagoitia-Calderón, G. Urriolagoitia-Sosa, L. H. Hernández, E. A. Merchán, M. Vite, C. V. Feria, & J. A. Beltrán, "Análisis del desgaste de la articulación cabeza femoral-copa acetabular mediante simulación experimental con máquina perno-disco," *Revista Colombiana de Biotecnología*, vol. 10, núm 1, pp. 94-110, 2008.

[7] J. I. Campos-López, A. Fuerte-Hernández, L. H. Hernández-Gómez, A. Martínez-García, J. A. Beltrán-Fernández, & G. Urriolagoitia-Calderón, "Determination of the mechanical properties of lumbar porcine vertebrae with 2D digital image correlation," *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, vol. 13, núm. 3, pp. 195-200, octubre 2015.

[8] A. Rangel-Elizalde, J.A. Beltrán-Fernández, L.H. Hernández-Gómez, A. González-Rebatú, J. Martinez-Paredes, & L.M. Valverde-Cedillo, "Diseño de un tornillo corpóreo como dispositivo auxiliar en el tratamiento de alteraciones en la columna vertebral," *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 6, núm. 1, pp. 47-52, agosto 2014.

[9] P. Moreno Garibaldi, "Diseño y manufactura de una prótesis de maxilar inferior para pacientes con anquilosis temporomandibular lateral," Maestría en Ingeniería Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2014.

[10] M. Ferrazzini,"Virtual middle ear: dynamic mathematical model based on the finite element method," Phd Thesis at Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 2013.

[11] Rong Z. Gan, Bin Feng, & Qunli Sun, "Three-dimensional finite element modeling of human ear for soundtransmission," *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 32, núm. 6, pp. 847-859, junio 2004.

[12] H. Fastl, & E. Zwicker, *Psycho-acoustics: Facts and Models*. Springer, 2007.

BIBLIOGRAFÍA LATINOAMERICANA

en revistas de investigación científica y social

BIBLAT

Portal especializado en revistas científicas y académicas publicadas en América Latina y el Caribe

http://biblat.unam.mx/es/

Científica, vol. 21, núm. 1, pp. 9-16, enero-junio 2017.
eISSN en trámite, ISSN 1665-0654, ESIME Instituto Politécnico Nacional México

Estimación del desgaste volumétrico de componentes tribológicos lubricados, mediante la aplicación combinada de modelos de cuantificación de partículas de desgaste

Yamile **Lara**

Universidad de Oriente
Centro de Termofluidodinámica y Mantenimiento (CTYM)
Puerto La Cruz.
VENEZUELA.

Fax: 0281-4203271, apartado: 4653

correos electrónicos (email): yamilelara@gmail.com
ylara@udo.edu.ve

Recibido 04-08-2016, aceptado 20-12-2016.

Resumen

Se presenta un estudio que combina los modelos propuestos por Espinoza [1], Macian *et al*. [2] e Iwai [3], los cuales plantean aproximaciones analíticas entre el desgaste de las máquinas y la concentración de las partículas contaminantes presentes en el aceite que las lubrica. Para esto, se realizó un estudio experimental de desgaste por deslizamiento de piezas de metal, en diferentes condiciones de operación, con una máquina tribológica, la cual posee una parte dinámica (cilindros de desgaste) y una parte estática (cojinetes de contacto deslizante). La contaminación del lubricante se midió con un espectrómetro de emisión atómica y un contador de partículas. Se concluye, que los modelos de cuantificación de desgaste propuestos por Espinoza [1], Macian *et al*. [2] e Iwai [3], por sí solos, presentan diferencias significativas, entre un 50% y 80%, con respecto al valor de desgaste que se quiere medir, sin embargo con los datos experimentales obtenidos y la aplicación combinada de estos modelos es posible minimizar el error relativo porcentual en un 20 y 30%.

Palabras clave: desgaste, modelos analíticos, análisis de lubricante.

Abstract (Volumetric Wear Estimation of Lubricated Tribological Components by Means of Combining Analytical Models for Wear Prediction)

Espinoza [1], Macian *et al*. [2] and Iwai [3] developed analytical models to correlate machine wear to the concentration of wear particles found in their lubricant. A wear apparatus was designed and build in order to address the validity of the proposed models. The apparatus, composed of a rotating wear cylinder and a static contact bearing, allows sliding metal parts at different operational conditions. The wear particles captured in the lubricant were measured with an atomic emission spectrometer and a particle counter. Then, the parameters of the Espinoza [1], Macian *et al*. [2], and Iwai *et al*. [3] were calculated. The predicted wear with the fitted models were off by as much as 50%, in some cases 80%, when compared with the experimental wear. This work shows that the models, in fact, complement each other and that the combined model can reduces the relative error, when predicting wear, somewhere between 20% and 30%.

Index terms: wear, analytical approaches, used oil analysis.

1. Introducción

El análisis de las partículas que son generadas por el roce de dos o más superficies en contacto y en movimiento relativo, que son transportadas por el aceite lubricante (partículas de desgaste), se ha consolidado como una técnica con gran potencial para la estimación cuantitativa del desgaste en los sistemas tribológicos lubricados (STL).

En efecto, en diversos trabajos presentados por la comunidad científica del área tribológica, se ha reseñado que el estudio de la morfología, tamaño, concentraciones y composiciones de estas partículas, proveen valiosa información de los mecanismos y severidad del desgaste que pudiera presentarse en la operación de los STL [4], [5], [6], [7], [3].

Esto ha impulsado dos campos de investigación: uno, enfocado al estudio morfológico de las partículas de desgaste [6] [8] y el otro, dirigido a su cuantificación [9], [10], [1], [11], para lo cual, se ha promovido el desarrollo de varias técnicas que permiten determinar la presencia de estas en el aceite y evaluar sus características.

Este conjunto de técnicas que se pueden clasificar como métodos de monitoreo continuo (*e.g*., analizadores ferromágneticos, contadores de partículas) y métodos de monitoreo discontinuos o de laboratorio (*e.g*., espectrometría, ferrografía analítica, conteo de partículas) [12], [13], poseen limitaciones importantes (*e.g*. límites de detección, sensibilidad), que son inherentes al fenómeno físico que las gobierna, por lo que el desgaste estimado a través de las mismas, no se correlaciona con el desgaste verdadero que se quiere medir.

De lo anterior, se infiere, que la determinación del desgaste a partir del análisis de partículas contaminantes en el lubricante, aún es una técnica que se encuentra en desarrollo y que requiere de una mayor investigación.

En cuanto a los antecedentes, Tormos [11] indica que varios investigadores entre los que se pueden nombrar: Rigaux, Pérez, Kjer, Hubert, Stodola, Espinoza, Fygueroa, Macian *et al*., desarrollaron aproximaciones analíticas modelando algunos aspectos que afectan la determinación de las concentraciones de las partículas de desgaste en motores de combustión interna usando técnicas espectrométricas. Estos trabajos presentan metodologías que se extienden desde los acercamientos estadísticos, corrección y normalización de los efectos de la condición de funcionamiento del motor sobre las concentraciones, hasta la búsqueda de concentraciones de referencia que permitan caracterizar el grado de contaminación de aceite y generar escalas comparativas confiables [14], [15]. En el año 2010, Iwai *et al*. [3], propusieron un modelo que permite estimar cuantitativamente el desgaste de piezas bajo condiciones de lubricación, pero usando la técnica de conteo de partículas.

Basado en lo anteriormente expuesto, y destacando que la verificación experimental de los modelos analíticos es de vital importancia para garantizar la confiabilidad de los resultados y su aplicabilidad en el sector industrial, el presente trabajo experimental, está dirigido a la evaluación del desgaste que se produce en componentes tribológicos, mediante la aplicación combinada de los modelos de cuantificación de desgaste propuestos por: Espinoza [1], Macian *et al*. [2] e Iwai *et al*. [3], buscando una mejor aproximación al valor del desgaste real.

Para esto, se realizan pruebas de desgaste por deslizamiento de piezas de metal lubricadas, en diferentes condiciones de operación, con una máquina tribológica diseñada para tal fin, la cual se caracteriza por poseer una parte dinámica (cilindros de desgaste) y una parte estática (cojinetes de contacto deslizante).

2. Desarrollo

2.1. Metodología y resultados

El desarrollo de esta investigación se presenta por etapas (véase Fig. 1) a fin de facilitar su comprensión.

Etapa 1. Revisión de los modelos analíticos de cuantificación de partículas de desgaste en aceite lubricante usado, basados en espectrometría de emisión atómica y conteo de partículas

Los modelos presentados por Espinoza [1], Macian *et al*. [2], se basan en determinar la velocidad de desgaste de un motor de forma indirecta con la medición de la velocidad de contaminación del aceite usando espectrometría. El modelo desarrollado por Espinoza [1], corrige la concentración de las partículas de desgaste generadas por un motor considerando la influencia combinada del filtro, consumo y añadidos de aceite. Por otra parte, Macian *et al*. [2], describen una formulación parecida a la de Espinoza [1], sin considerar el filtro de aceite, pero incorporando en su el consumo de aceite por evaporación que se presenta en los motores. En ambos modelos, se calcula el aporte de elementos químicos individuales de las partículas contenidas en el aceite lubricante, lo cual podría relacionarse con el desgaste volumétrico total del STL, pero se requiere de una mayor investigación para relacionarlo con el desgaste de un componente especifico de un STL complejo [16].

Por otro lado, Iwai *et al*. [3] desarrollaron una formulación matemática usando las características geométricas de las celdas de flujo de los contadores de partículas ópticos y de las partículas contenidas en el aceites. Con este modelo se pue-

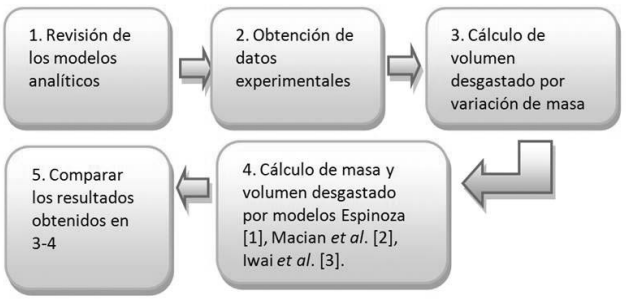


Fig. 1. Etapas de desarrollo de la investigación.

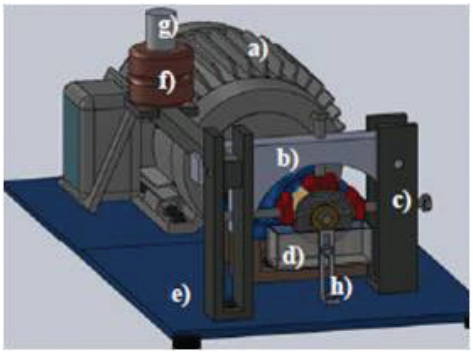


Fig. 2. Esquema del equipo utilizado para la generación de desgaste. Partes: a) motor, b) porta cojinete, c) soporte, d) depósito de lubricante, e) base, f) banco de pesas, g) guía de pesas, h) elemento de ascenso-descenso.

de cuantificar directamente el desgaste volumétrico total de las piezas de un STL, pero como el contador óptico no indica la composición química de las partículas, los resultados de desgaste obtenidos, no se pueden relacionar con algún componente específico de los STL.

Etapa 2. Obtención de los datos experimentales: concentración y características geométricas de las partículas de desgaste en condiciones de laboratorio

El estudio demandó la obtención de muestras de aceite lubricante con partículas de desgaste generadas con un STL simple con el que se pudiera calcular el desgaste real generado en las piezas a través del método de variación de masa, por lo que se utilizó el equipo presentado en la Fig. 2, el cual hace incidir cojinetes de contacto deslizante con la parte periférica de unos discos de desgaste, a una velocidad constante y bajo condiciones de carga controladas.

Para la medir las concentraciones de partículas en el aceite lubricante se usó un espectrómetro de emisión atómica (Spectroil M) y un contador de partículas Laser Net FinesC. Hubo un especial cuidado en la homogenización de las muestras, ya que esto tiene un efecto importante en los resultados experimentales que se obtienen [16].

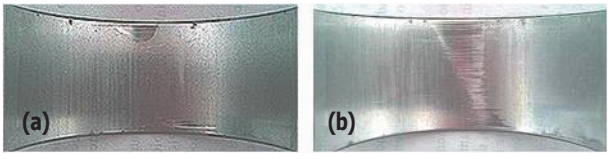


Fig. 3. Huellas del desgaste generado en los cojinetes usados en el ensayo 1 (a) y el ensayo 2 (b).

Tabla 1. Condiciones de operación de los ensayos.

Parámetro	Ensayo 1	Ensayo 2
Voltaje	40 V	40 V
Velocidad giro (rpm)	1690-1715	1690-1715
Cantidad de aceite (ml)	200	200
Carga (N)	156,44	501,06
Presión contacto (kpa)	57,6	103,29
Tipo de lubricante	SAE 20 W 50	SAE 20W 50
Distancia recorrida (km)	45	45
Número de muestras	10	10
Cantidad de muestra (ml)	5	5

Seguidamente, a través de pruebas de funcionamiento del equipo de generación de desgaste, se establecieron las condiciones experimentales mostradas en la Tabla 1, lográndose recrear 2 escenarios: El "ensayo 1" con condiciones de poco desgaste y el "ensayo 2" de mayor desgaste.

En conformidad con los escenarios usados (ensayo 1 y ensayo 2) en la Fig. 3 se muestran imágenes fotográficas de marcas de desgaste dejadas en la superficie de los cojinetes luego de realizar los ensayos, se evidencia mayor desgaste en el cojinete que fue ensayado con mayor carga (véase Fig. 3b).

Los elementos químicos considerados para el cálculo de los métodos que usan espectrometría fueron aluminio (Al), estaño (Sn) hierro (Fe) y plomo (Pb), se seleccionaron después de comparar los resultados de desgaste obtenidos en pruebas piloto, la composición química del AISI 4140, material del disco de desgaste, y de un análisis de espectrometría dispersiva de rayos X (EDAX) realizado al cojinete usado (véase Tabla 2).

Etapa 3. Cálculo del volumen desgastado de las piezas por el método de variación de masa

Usando el método de variación de masa de las piezas (cojinete + disco) y con la información de la densidad de los materiales, se determinó el volumen desgastado generado las piezas (véase Tabla 3), el cual es considerado el valor de referencia "desgaste real volumétrico" para esta investigación.

Etapa 4. Cálculo del volumen desgastado por los modelos Espinoza [1], Macian *et al.* [2] e Iwai *et al.* [3]

En la Fig. 4, se muestran las concentraciones experimentales, y las corregidas por el modelo de Espinoza [1] para el Al,

Tabla 2. Resumen del análisis químico obtenido para el semicojinete de biela en estudio.

Área	Metal	%Wt
A	Hierro	100,00
B	Aluminio	100,00
C	Matriz: Aluminio	84,80
D	Matriz: Plomo	81,20
Capa de	Plomo	89,58
contacto	Hierro	1,96
	Indio	8,46

Tabla 3. Desgaste real volumétrico del conjunto cojinete-disco para cada ensayo realizado.

Ensayo	Tribo-elemento	Variación de masa (mm^3)
1.	cojinete + disco	0,7407
2.	cojinete + disco	3,3425

correspondiente al ensayo 1, donde se evidencia, que este método, permite corregir las desviaciones ocasionadas por fugas y añadidos. Se observa que a partir de 27,36 km de deslizamiento, las concentraciones se mantuvieron constantes (3,41 ppm), con pequeñas variaciones propias del instrumento, lo que indica que a partir de ese punto no se generó más desgaste.

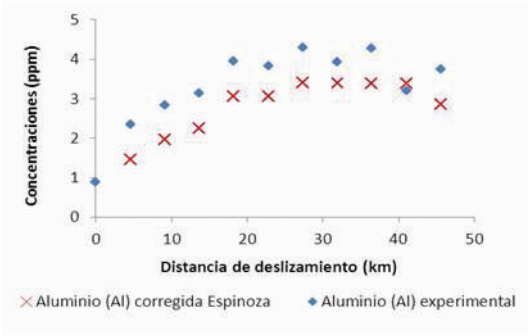


Fig. 4. Gráfico de comparación de concentraciones experimentales y concentraciones corregidas para el elemento aluminio (Al) versus la distancia en km.

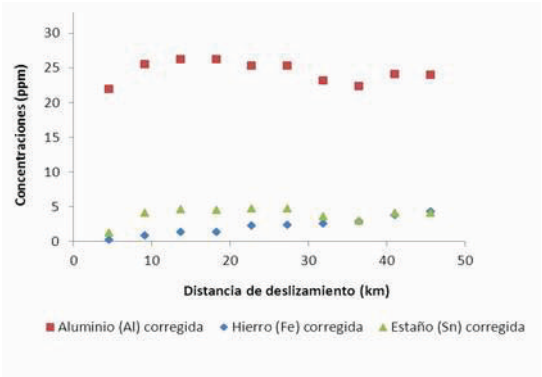


Fig. 5. Gráfico de las concentraciones corregidas del hierro (Fe), aluminio (Al) y el estaño (Sn) versus la distancia de deslizamiento en km.

En la Fig. 5, para el ensayo 2, se observan las concentraciones corregidas por el modelo de Espinoza [1] de los elementos: Fe, Al y Sn. Se observa que el Al dejó de desgastarse a los 13,68 km de deslizamiento, el Sn a los 27,36 km, mientras que el Fe estuvo desgastándose hasta el final de la prueba (45,5 km).

En la Tabla 4, se presentan los resultados de las masas contaminantes acumuladas de los elementos químicos estudiados en los ensayos 1 y 2 usando el modelo de Espinoza [1]. Para la correspondencia en gramos (g) se empleó la Ec. 1, considerando el volumen total de aceite usado por ensayo (200 ml).

En la Fig. 6, se muestran las concentraciones experimentales, y las concentraciones corregidas por el modelo de Macian *et al*. [2] para el Al, correspondiente al ensayo 1. Se observa que este método también corrigió las concentraciones experimentales en cuanto a fugas y añadidos y a partir de 27,36 km de deslizamiento (3,53 ppm) no se produjo más desgaste.

Tabla 4. Masa de contaminantes: aluminio (Al), hierro (Fe) y estaño (Sn) (ppm) para el ensayo 1 y 2, en un volumen de 200ml, y su equivalencia en gramos (g).

Ensayo	Elemento	Masa (ppm)	Masa (g)
1.	Aluminio (Al)	682,04	0,00055
2.	Hierro (Fe)	863,00	0,00069
	Aluminio (Al)	5243,92	0,00419
	Estaño (Sn)	944,00	0,00076

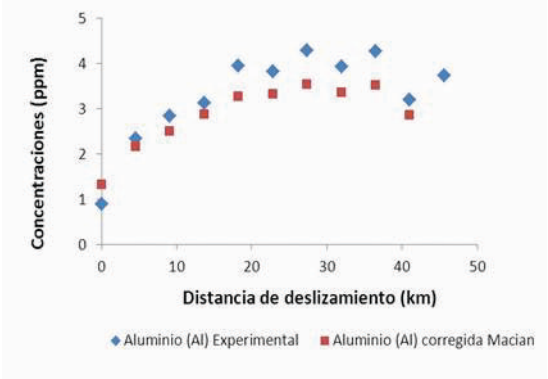


Fig. 6. Gráfico que compara las concentraciones experimentales vs las concentraciones corregidas del aluminio (Al) versus la distancia en km.

Tabla 5. Masa de contaminantes: aluminio (Al), hierro (Fe) y el estaño (Sn) (ppm) para el ensayo 1 y 2, en un volumen de 200 ml, y su equivalencia en gramos (g).

Ensayo	Elemento	Masa (ppm)	Masa (g)
1.	Aluminio (Al)	707,6	0,00057
2.	Hierro (Fe)	773,2	0,00062
	Aluminio (Al)	4251,0	0,00340
	Estaño (Sn)	733,6	0,00059

La Fig. 7, muestra el gráfico de las concentraciones corregidas de los elementos Fe, Al y Sn por el modelo de Macian *et al*. [2]. Se observa que el Al dejó de desgastarse a los 13,68 km de deslizamiento, el Sn a los 22,80 km y el Fe estuvo desgastándose hasta el final de la prueba (45,5 km).

En la Tabla 5, se presentan los resultados de las masas contaminantes acumuladas de los elementos químicos estudiados en ensayos 1 y 2 usando el modelo de Macian *et al.* [2].

Para el cálculo de Iwai *et al*. [3], los datos geométricos de la celda de flujo se consiguieron del equipo, y el espesor de las partículas, se obtuvo filtrando muestras aceite con tamices de diferentes tamaños y midiendo estadísticamente el espesor de las partículas filtradas con la ayuda de un microscopio óptico. Los resultados obtenidos se graficaron y se encontró relación entre el tamaño de las partículas y su espesor (véase Fig. 8).

En las tablas 6 y 7, se presenta el volumen de desgaste promedio por intervalo de distancia, para el ensayo 1 y el ensayo 2, respectivamente. Se puede observar, que a pesar de que en el ensayo 2 se genera una mayor cantidad de partículas (part/ml) que en el ensayo 1, el desgaste global calculado (W) por este modelo es mayor para el ensayo 1. Esta incongruencia se debe, al cálculo del diámetro equivalente (d) de las partículas de desgaste que hace el instrumento de medición, la cual puede estar afectada por la presencia de burbujas de aire en la muestra, y la posición en la que la partícula de desgaste pasa por la celda de flujo.

En las tablas 6 y 7 se observa que el volumen de desgaste generado evaluado por distancia deslizada (km), disminuyó con el tiempo tanto para ambos ensayos. Esto es de esperarse, ya que el desgaste inicial se generó en condiciones de lubricación de película delgada habiendo mayor contacto

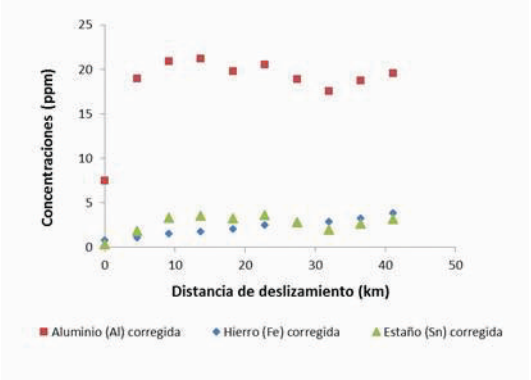


Fig. 7. Gráfico de las concentraciones corregidas del hierro (Fe), aluminio (Al) y el estaño (Sn) versus la distancia de deslizamiento en km.

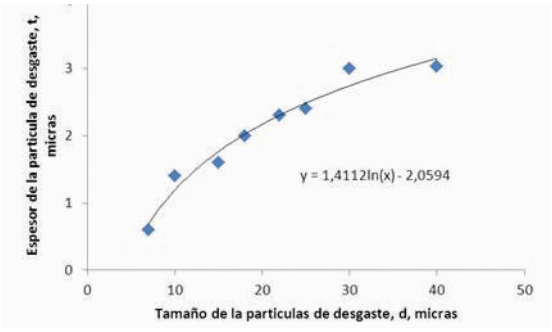


Fig. 8. Relación entre el tamaño y el espesor de las partículas de desgaste del conjunto disco de desgaste-cojinete estudiado.

Tabla 6. Volumen de desgaste promedio generado (W), por intervalo de distancia (km) para el ensayo 1.

Ensayo 1					
km	**part/ml**	**q(núm/ml)**	**d(micras)**	**t(micras)**	**W(micras^3)**
	18200				
0	143580	109045	7	0.69	126387740.6
5	229526	85946	6.9	0.67	93927072.31
10	302002	72476	6.8	0.65	74548692.77
15	366917	64915	6.9	0.67	70943102.63
20	426734	59817	7.1	0.71	73404674.16
25	482777	56043	6.9	0.67	61247235.63
30	535866	53089	7.1	0.71	65148381.67
35	586551	50685	6.6	0.60	45908819.14
40	635222	48671	7.2	0.73	63136570.03
45	681160	45938	7.3	0.75	62899564.26

Total (micras^3) = 737551853.23

Total (mm^3) = 0.7376

Tabla 7. Volumen de desgaste promedio generado (W), por intervalo de distancia (km) para el ensayo 2.

Ensayo 2					
km	**part/ml**	**q(núm/ml)**	**d(micras)**	**t(micras)**	**W(micras^3)**
	18200				
0	492316	474116	6.2	0.52	323572640.1
5	681142	188826	5.9	0.45	100852000.8
10	791597	110455	5.9	0.45	58994035.51
15	869967	78370	6.1	0.49	49469096.92
20	930755	60788	5.9	0.45	32466881.81
25	980422	49667	6.2	0.52	33896519.66
30	1022420	41998	6.3	0.54	30891203.56
35	1058790	36370	6.1	0.49	22957650.31
40	1090880	32090	6	0.47	18669056.3
45	1118980	28100	6.1	0.49	17737420.23

Total (micras^3) = 689506505.24

Total (mm^3) = 0.6895

entre las superficies (cojinete-disco de desgaste) y posteriormente con el desgaste de las piezas, se llegó a una condición hidrodinámica sin contacto.

Etapa 5. Comparación de los resultados obtenidos por los modelos estudiados y el método de variación de masa

En la Tabla 8 se muestra el desgaste obtenido en mm^3 y el error relativo porcentual (ER%) de cada método tomando como referencia los valores de la variación de masa. Es importante destacar, que los resultados del método de variación de masa, los obtenidos por el método de Espinoza [1] y de Macian *et al*. [2], se pasaron a volumen perdido (mm^3), usando la densidad volumétrica de los materiales previamente estudiados.

Como se observa en la Tabla 8, existe una marcada diferencia entre el desgaste perdido determinado por el método de variación de masa y los obtenidos por el modelo de Espinoza [1] y de Macian *et al*. [2], para el ensayo 1 y 2, con errores relativos porcentuales de 73% y 47%, y de 64% y 48%, respectivamente. Esto se debe, a que la espectrometría posee limitaciones en la detección de partículas con tamaños mayores a 8 micras. En cuanto al modelo de Iwai *et al*. [3] se observa para el ensayo 1, una buena aproximación con un error relativo porcentual del 0,41%, contrariamente al resultado del ensayo 2 (ER% de 79,4%). Esta variación tan significativa entre los ensayos 1 y 2, para este último modelo, puede deberse al diámetro equivalente promedio usado para el cálculo, *d*, variable de entrada al modelo (y que también se usó para determinar el espesor de las partículas), que puede estar afectado por la presencia de burbujas de aire, y la posición en la que la partícula pasa por la celda de flujo del instrumento, debido a que es un contador del tipo óptico.

En este sentido, Iwai *et al*. [3] en la presentación de su modelo plantea, que para velocidades y cargas pequeñas, se pueden presentar diferencias relativamente grandes en los resultados.

3. Discusión

Se evaluaron tres modelos analíticos a través de los cuales se puede obtener el desgaste volumétrico de los componentes de un STL y que utilizan dos técnicas diferentes de cuantificación de partículas, que son complementarias: el modelo de Espinoza [1] y el de Macian *et al*. [2], usan la técnica de espectrometría de emisión, con el que se puede cuantificar partículas con tamaños de 1 a 8 micras, y el modelo de Iwai *et al*. [3], que usa el conteo de partículas, cuantificando partículas con tamaños desde 5 a 100 micras. En este sentido, la propuesta de esta investigación consiste en combinar el modelo de Espinoza [1] con

masa y los modelos estudiados.

Tabla 8. Resumen del desgaste obtenido por el método de variación de masa y los modelos estudiados.

			Volumen perdido (mm^3)		
Ensayo	**Tribo-elemento**	**Variación de masa**	**Iwai *et al.* (ER%)**	**Espinoza (ER%)**	**Macian *et al.* (ER%)**
1	cojinete + disco	0,7407	0,7376 (.41%)	0,2022 (73%)	0,2111 (64%)
2	cojinete + disco	3,3425	0,6895 (79,4%)	1,7403 (47%)	1,4163 (48%)

el de Iwai *et al*. [3] y el modelo de Macian *et al*. [2] con el de Iwai *et al*. [3], para comprobar si existe o no, mejoría de los resultados obtenidos (véase Tabla 8) con respecto al valor de desgaste real que fue obtenido por el método de variación de masa.

Para evitar la cuantificación doble de las partículas en el rango de solape de los métodos (5 a 8 micras) y considerando las observaciones realizadas por Iwai *et al*. [3] en cuanto a las causas de las desviaciones en los resultados obtenidos por su modelo (esto en función de tratar de minimizar los problemas relacionados con la distribución de partículas), se realizó nuevamente el cálculo para el método de Iwai *et al*. [3], pero solo se consideraron partículas iguales y mayores a 20 micras, aprovechando que el software del contador posee un reporte especial para estas, lo cual resultó ser más confiable para los cálculos subsiguientes.

Luego, los resultados determinados con el modelo de Espinoza [1] y el modelo de Macian *et al*. [2], por separado, se suman con los resultados de este nuevo cálculo (véase Tabla 9) obteniéndose el desgaste volumétrico (mm^3) de la combinación de los modelos mostrados en la Tabla 10.

Tabla 9. Resumen de resultados obtenidos por el método de Iwai *et al.* [3] considerando solo partículas iguales y mayores a 20 micras.

Ensayo	**Tribo-elemento**	**Volumen perdido (mm^3) Iwai *et al.***
1	cojinete + disco de desgaste	0,2139
2	cojinete + disco de desgaste	0,5999

4. Conclusiones

- Los modelos de cuantificación de desgaste propuestos por Espinoza [1], Macian *et al*. [2], e Iwai *et al*. [3], presentan por si solos, diferencias significativas respecto al valor real de desgaste que se quiere medir.
- La aplicación combinada de los modelos estudiados es posible, para el cálculo volumétrico de del desgaste y con esto se obtiene un valor de desgaste que se aproxima mejor al valor real.
- El modelo de Iwai, se aproxima muy bien al desgaste obtenido en un intervalo de tiempo dado.
- El desgaste calculado a partir de las concentraciones medidas por espectrometría, es inferior a la real, ya que detecta una fracción del desgaste total.

Referencias

[1] H. Espinoza, "Diagnóstico de fallos en motores de encendido por compresión de automoción". Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España, 1990.

[2] V. Macián, B. Tormos, P. Olmeda, & L. Montoso, "Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis," *Tribology International*, núm. 36, pp. 771-776, 2003.

[3] Y. Iwai, T. Honda, T. Miyajima, S. Yoshinaga, M. Higashi, & Y. Fuwa, "Quantitative estimation of wear amounts

Tabla 10. Resumen de los resultados obtenidos por el método de variación de masa y el desgaste obtenido por la combinación de los modelos estudiados, y error relativo porcentual (ER%) de cada uno de estos modelos con respecto a la variación de masa.

			Volumen perdido (mm^3)	
Ensayo	**Tribo-elemento**	**Variación de masa**	**Iwai *et al.* + Espinoza (ER%)**	**Iwai *et al.* + Macian *et al.* (ER%)**
1	cojinete + disco	0,7407	0,4161 (43%)	0,4225 (42%)
2	cojinete + disco	3,3425	2,3403 (30%)	2,0163 (39%)

by real time measurement of wear debris in lubricante oil," *Tribology International*, núm. 43, pp 388-394, 2010.

[4] K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*. Ed. Elsevier, 2002.

[5] P. Dempsey, D. Lewicki, & H. Decker, *Investigation of Gear and Bearing Fatigue Damage Using Debris Particle Distributions*, NASA/TM-2004-212883. EEUU, 2004.

[6] A. Memon, & S. Mohammad, "Building Relationship Network for Machine Analysis from Wear Debris Measurements," *International Journal of computational intelligence*, vol. 3, núm. 2, 2006.

[7] N. Myshkin, L. Markova, & A. Grigoriev, "Condition Monitoring and Predictive Analysis of Tribosystems by Wear Debris," *Practicing Oil Analysis Magazine*, 2005.

[8] A. Sala, B. Tormos, V. Macian, & E. Royo, "Fuzzy diagnosis module based on interval fuzzy logic: oil análisis aplicación," *ICINCO 2005. International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, España, (2005)

[9] D. Anderson, & R. Driver, "Equilibrium Particle Concentration in Engine Oil," *Wear* 56, pp. 415-419, 1979.

[10] J. Brown, C. Saba, W. Rhine W. & K. Eisentraut, "Particle Size Independent Spectrometric Determination of Wear Metals in Aircraft Lubricating Oils," *Analytical Chemistry*, núm. 52, pp. 2365-2370, 1980.

[11] B. Tormos, *Diagnóstico de motores diesel mediante el análisis del aceite usado*. Ed. Reverté, España, 2005.

[12] A. Davies, *Handbook of Condition Monitoring*, Ed. Springer, Londres, UK, 1998.

[13] S. Raadnui, "Transmission condition evaluation through magnetic chip detector (MCD) ferrous wear particle analysis," in: Shrivastav OP, Al-Najjar B & Rao RBKN (eds) *Proc of the 16th Int Congress of COMADEM*, Växjö, Sweden, 27th - 29th August 2003, pp. 473-479, 2003.

[14] Y. Lara, & H. Espinoza, "Estudio comparativo del desgaste en un motor de encendido por chispa usando gasolina y gas natural como combustible", *Científica*, vol. 13, núm. 1, 2009.

[15] Y. Lara, & H. Espinoza, "Modelo analítico para la determinación de la velocidad de desgaste en motores de encendido provocado mediante análisis de lubricante," *Científica*, vol .12, núm. 2, 2008.

[16] Y. Lara, "Estimación del desgaste en componentes tribológicos lubricados, mediante la aplicación combinada de modelos de cuantificación de partículas contenidas en el lubricante," Tesis de maestria. Universidad de Oriente núcleo Anzoategui, Barcelona, Venezuela, 2011

Sistema de Información Científica

Redalyc:
Red de Revistas Científicas de América Latina
y el Caribe, España y Portugal

www.redalyc.org

Científica, vol. 21, núm. 1, pp. 17-24, enero-junio 2017.
eISSN en trámite, ISSN 1665-0654, ESIME Instituto Politécnico Nacional México

Generalidades de estrategias de control en aerogeneradores de transmisión directa

Luz Yazmín **Villagrán-Villegas**[1]
Isaura Victoria **Hernández-Rodríguez**[2]
Juan Carlos **Anzelmetti-Zaragoza**[1]
Alejandro **Marquina-Chávez**[1]
Celia María **Calderón-Ramón**[1]

[1]Universidad Veracruzana
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
campus Poza Rica.
Prolongación Av. Venustiano Carranza s/n, col. Revolución
CP 93390 Poza Rica, Veracruz.
MÉXICO.
[2]Sin adscripción.
MÉXICO.

Tels. [1](+52) 782 823 8143
[2](+52) 777 362 3811

correos electrónicos (email):
yvillagran@uv.mx
isauravhr@hotmail.com, janzelmetti@uv.mx
jlaguna@uv.mx, ccalderon@uv.mx

Recibido 02-06-2016, aceptado 24-11-2016.

Resumen

Este artículo proporciona un punto de vista general de las estrategias de control empleadas en aerogeneradores de transmisión directa. Actualmente, la literatura técnica está enfocada en control de aerogeneradores de imanes permanentes (PMSG) y es escasa en aerogeneradores de rotor bobinado (WRSG). En este trabajo se concluye que debido a las ventajas técnicas, económicas y ecológicas es importante desarrollar estrategias de control para aerogeneradores con generadores sincrónicos eléctricamente excitados y mostrar algunos resultados del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL, México) con modelos de generador de rotor devanado donde este tipo de modelo se puede utilizar en modelos de transmisión directa.

Palabras clave: aerogeneradores, transmisión directa, imanes permanentes, rotor devanado, generador síncrono, estrategias de control.

Abstract
(Issues on Control of Direct-Drive Wind Turbine Generator)

This paper provides an overview of control strategies employed in direct drive wind turbine generators. Currently, technical literature is focused on wind turbines control permanent magnet synchronous generators type (PMSG) and it's scarce about wind turbines with wound rotor synchronous generators type (WRSG). This paper concludes that due to technical, economic and ecological advantages it's important to develop control strategies for wind turbines with electrically excited synchronous generators and show some results of National Institute of Electricity and Clean Energy (INEEL, Mexico) with models of wound rotor generator where this kind of model can be used in models direct drive.

Index terms: wind turbine generator, direct drive, permanent magnet, wound rotor, synchronous generator, control strategies.

1. Introducción

Existen tres tipos principales de sistema de conversión electromagnética usadas actualmente con turbinas de viento [1] como se muestra en la Figura 1. El primero de ellos utiliza un generador de inducción asíncrono de jaula de ardilla; en este caso, la velocidad del rotor y la velocidad del estator son diferentes, por esta razón es necesario tener una caja multiplicadora o de engranajes para igualar las velocidades. Además, el deslizamiento del generador varía según la cantidad de energía generada, la cual no es constante, pero estas variaciones de velocidad son en orden de 1%, por lo tanto se considera como una turbina de velocidad constante o velocidad fija. En realidad, el diseño danés, o de velocidad constante, regularmente se combina con un control por pérdida de la energía aerodinámica.

El generador de inducción doblemente alimentado es otro tipo de generador que necesita un caja multiplicadora y además que el devanado de estator del generador esta acoplado a la red.

El último tipo de la clasificación es el aerogenerador de transmisión directa. En este caso la turbina de viento trabaja sin una caja multiplicadora. El aerogenerador tiene un generador síncrono multipolo o un generador con rotor de imanes per-

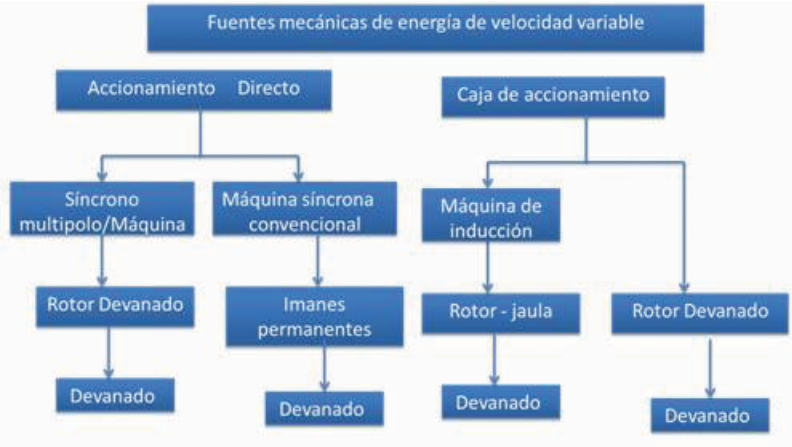


Fig. 1. Fuentes mecánicas de energía de velocidad variable [1].

manentes y usando un convertidor de potencia es posible acoplarlo directamente a la red.

Hay dos métodos para conectar turbinas de viento a generadores para generar energía, como se muestra en la Figura 2. El método más común es el multiplicador de velocidad mecánica o caja de engranajes. En la primera configuración, la potencia mecánica es transmitida a la máquina eléctrica con una velocidad alta. Este método es el más usado por su ventaja de la estabilidad del sistema.

Una alternativa es acoplar el generador directamente a la turbina sin el multiplicador. Este diseño tiene sus ventajas y es atractivo porque reduce los costos de mantenimiento y elimina el elemento débil de la conversión de energía: el multiplicador de velocidad.

El aerogenerador de transmisión directa es económicamente viable porque elimina un número de fallas y una fuente adicional de ruido al quitar un elemento y resulta en un alto desempeño [2].

2. Clasificación general de generadores síncronos

El generador síncrono tiene dos elementos principales: el campo o rotor y la armadura o estator, este último tiene tres devanados como se observa en la Figura 3.

Actualmente, existen dos tipos de generadores síncronos que han sido utilizados en la industria de las turbinas de viento: el generador síncrono de rotor devanado y el generador síncrono de imanes permanentes, WRSG y PMSG por sus siglas en inglés, respectivamente [3].

3. Generador síncrono de rotor devanado WRSG

La velocidad del generador de rotor devanado está determinada por la frecuencia y dicha frecuencia depende del número de polos del rotor. El devanado del rotor es excitado con corriente directa utilizando anillos deslizantes y escobillas. También se utiliza sin escobillas y conectado a un rectificador de potencia.

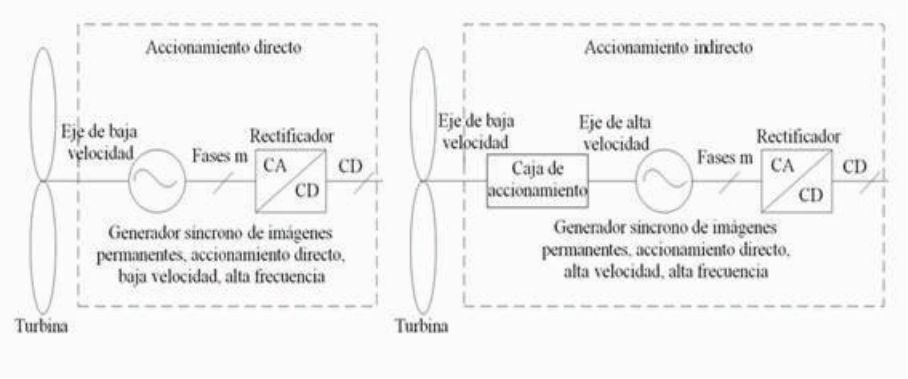


Fig. 2. Acoplamiento de turbina de viento al generador [2].

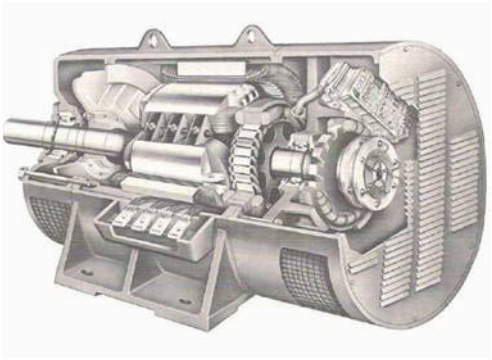


Fig. 3. Generador síncrono [3].

La eficiencia de los generadores de transmisión directa es menor que la de turbogeneradores convencionales y también son más pesados. Los generadores de transmisión directa son diseñados con un gran diámetro para mejorar la eficiencia y reducir el peso de las partes activas [4].

La estructura de los modelos de turbinas de viento de velocidad variable con generador síncrono de transmisión directa y de aerogeneradores con velocidad constante son iguales. Además, de acuerdo a la literatura se menciona que el modelo del rotor así como la velocidad del rotor y los controladores de ángulo de paso son idénticos a los usados a los generadores de inducción doblemente alimentados [3].

En la Figura 4 se muestra la estructura de un aerogenerador de transmisión directa utilizando un generador síncrono.

4. Generador síncrono de imanes permanentes PMSG

El generador es una pieza central de un aerogenerador. El uso de imanes permanentes basado Neodimio tiene potencialmente altas eficiencias [5]. Estos generadores son predominantes en el mercado debido a su diseño modular y relativamente bajos requerimientos de mantenimiento [6].

De acuerdo a [6] los aerogeneradores modernos que son generalmente diseñados con generadores eléctricos de imanes permanentes y acoplamiento directo entre rotor y generador tienen las siguientes topologías más comunes:

- Generador de flujo axial con núcleo de aire.
- Generador de flujo axial con núcleo de hierro toroidal.
- Generador de flujo axial con núcleo de hierro ranurado
- Generador de flujo radial con núcleo de hierro ranurado.
- Generador de flujo transversal con núcleo de hierro ranurado.

En cada topología mencionada arriba, el tipo de flujo se refiere a la dirección de las líneas de flujo magnético cruzando el entrehierro entre los polos con respecto a la flecha rotatoria del generador. Las líneas de flujo alcanzan el núcleo de hierro y cambian de acuerdo a la geometría del núcleo. Las topologías más usadas en la industria son los generadores de flujo axial con núcleo de hierro ranurado y los generadores de flujo radial con núcleo de hierro ranurado. En la Tabla 1 se muestra una comparación entre las diferentes topologías.

5. Ventajas y desventajas de las turbinas de viento con transmisión directa y las turbinas de otras tecnologías

En el generador de imanes permanentes el número de polos no incrementa las pérdidas de la excitación como sucede en los generadores síncronos eléctricamente excitados.

En general algunas de las ventajas de los generadores de imanes permanentes de transmisión directa son: producción de energía en un pequeño porcentaje mayor si se compara con otros sistemas de generación con caja multiplicadora.

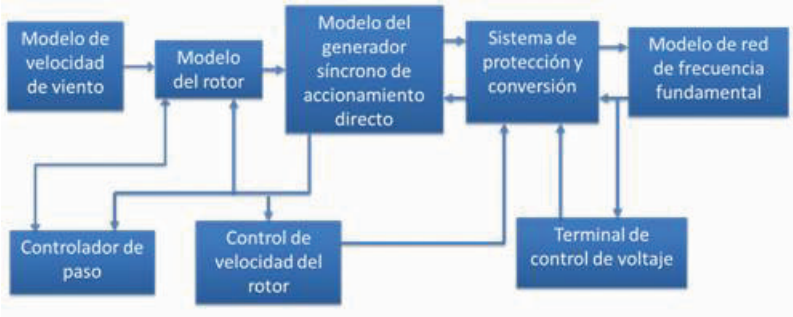


Fig. 4. Estructura del modelo de un aerogenerador de transmisión directa [3].

Tabla 1. Tabla comparativa de las diferentes topologías utilizadas en turbinas de viento de pequeña escala [6].

Topología	Ventajas	Desventajas
Flujo axial con núcleo de aire	De diseño y manufactura simple. Sin torque de retención. Operación silenciosa Bajo riesgo de desmagnetización de imanes permanentes. Operación multifase de fácil implementación.	Cambios estructurales por mantener una constante de aire para grandes diámetros. Posible inestabilidad térmica en el encapsulado de resina polímero. Grandes cantidades de Neodimio. Grandes dimensiones de diámetro exterior. Pérdidas por corrientes parásitas en devanado de cobre.
Flujo axial con núcleo toroidal de hierro	Diseño y manufactura simple. Sin torque de retención. Operación silenciosa. Bajo riesgo de desmagnetización de imanes permanentes. Sin pérdidas en núcleo. Operación multifase de fácil implementación.	Cambios estructurales por mantener una constante de aire para grandes diámetros. Grandes cantidades de Neodimio. Grandes dimensiones de diámetro exterior. Pérdidas por corrientes parásitas en devanado de cobre.
Flujo axial con núcleo de hierro y ranuras	Densidad de torque alto Generador escalable.	Cambios estructurales por mantener una constante de aire para grandes diámetros. Manufactura compleja. Presencia de torque de retención. Ruido relativo. Pérdidas por corrientes parásitas en devanado de cobre.
Flujo radial con núcleo de hierro y ranuras	Estructuralmente más robusto que los generadores de flujo axial. Menor material estructural. Menor dimensión de diámetro exterior. Diámetro definido sin considerar la longitud axial.	Presencia de torque de retención. Ruido relativo. Pérdidas por corrientes parásitas en núcleo Grandes cantidades de material magnético para laminar núcleo.
Flujo transversal con núcleo de hierro ranurado	Generalmente necesita la menor cantidad de Neodimio. Baja pérdida en cobre Devanado simple en bobinas. Alta densidad de torque.	Diseño y manufactura complejo. Topología no común. Alto potencial de dispersión magnética. Factor de Potencia bajo. Presencia de torque de retención. Requiere un estator por cada fase. Pérdidas por corrientes parásitas en núcleo.

Por otro lado, como desventajas el costo de los materiales ya que este tipo de generador necesita mejoras en los materiales (por defectos metalúrgicos) y la amortiguación de las vibraciones son las más representativas [7].

Las turbinas de viento manufacturadas por Enercon, Kenersys, Aeronautica y MTorres presentan ventajas técnicas, por ejemplo: invulnerabilidad a problemas derivados de perturbaciones de voltaje debidas a fallas en la red como resultado del uso de un convertidor o por pérdidas en el cobre del generador [8].

6. Control en aerogeneradores de transmisión directa

Los sistemas de control de aerogeneradores tienen numerosos sensores, actuadores, hardware y software. La principal función del hardware y software es procesar las señales de entrada de los sensores y generar la señal de salida para los actuadores que pueden ser hidráulicos o eléctricos, el control del torque del generador, los contactores del generador, los interruptores para activar los frenos de la flecha, entre otros [9].

La información técnica de los aerogeneradores acerca del control dice que la velocidad del rotor debe ser controlada debido a tres razones:

1. Capturar eficientemente más energía.

2. Proteger el rotor, el generador y el equipo de electrónica de potencia de sobrecargas a altas velocidades de viento.

3. En caso de que el generador sea desconectado accidentalmente.

En el libro *Wind and Solar Power Systems* de Mukund [10], el autor indica que los requerimientos de control de velocidad del rotor tiene cinco regiones, esto se muestra en la Figura 5 y se detalla a continuación:

1. *Velocidad de corte* a la cual la turbina comienza a producir energía.

2. *Constante máxima Cp* región donde la velocidad del rotor varía con la variación del viento para operar a TSR constante correspondiente al máximo valor de *Cp*.

3. *Durante vientos altos*, la velocidad de rotor es limitada al valor superior basado en el límite de diseño de los componentes del sistema. En la región de velocidad constante, *Cp* es menor que el valor máximo de *Cp* y la potencia se incrementa a tasas más bajas que en la primera región.

4. *A velocidades de viento aún más altas*, como durante una ráfaga, la máquina es operada a potencia constante para proteger el generador y la electrónica de sobrecargas.

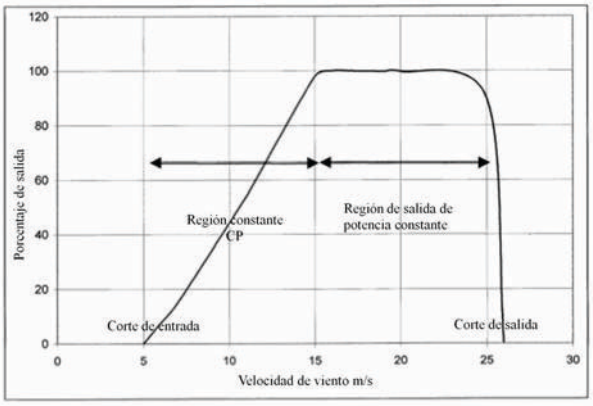


Fig. 5. Las cinco regiones del control de velocidad de la turbina [10].

5. *Velocidad de separación*. Más allá de cierta velocidad de viento, el rotor es apagado con el propósito de proteger las aspas, el generador y los demás componentes del sistema.

6.1. Control aerodinámico

El control aerodinámico del ángulo de ataque de las aspas es fundamental para determinar la cantidad de fuerza y torque generado por la turbina de manera similar a un aeroplano. Existen tres métodos para controlar este ángulo: regulación pasiva por pérdida, regulación activa por pérdida y control de ángulo de paso [11].

6.1.1. Regulación pasiva por pérdida

El control pasivo por pérdida aerodinámica emplea la reducción del coeficiente de sustentación y asocia incremento en el coeficiente de arrastre para colocar un tope a la potencia de salida a medida que aumenta la velocidad del viento, sin la necesidad de cualquier cambio en la geometría del aspa [9]. En aerogeneradores de accionamiento directo de imanes permanentes la geometría del rotor induce la parada y la potencia entregada por el rotor está limitada por las condiciones del viento [12].

6.1.2. Regulación activa por pérdida

El libro *The Modeling and control of Wind Turbine* muestra que en este tipo de control se tienen aspas con un mecanismo de control de paso ajustable para cuando la velocidad del viento excede el valor nominal, las aspas son controladas hacia el viento para reducir la energía capturada y así pueda permanecer en su valor nominal mediante el ajuste de ángulo de ataque de las aspas [13].

La velocidad del rotor es limitada para controlar la salida de potencia. Hay numerosos modos posibles de controlar la velocidad del rotor de la turbina con control de velocidad activo [14].

6.1.3. Control de ángulo de paso

El comportamiento aerodinámico de una turbina de viento puede ser controlado activamente variando el ángulo de las aspas alrededor de su eje longitudinal [15].

El control activo de ángulo de paso reduce el ángulo de ataque y por lo tanto el coeficiente de sustentación. Las principales ventajas del control activo de ángulo de paso son: el incremento de la energía capturada, la facilidad de frenado

aerodinámico y la reducción de las cargas extremas cuando la turbina se apaga [9]. Cuando hay velocidades del viento en el sitio, los efectos del control de ángulo de paso regulan la energía eólica extraída de manera que no se excedan los límites de diseño de turbina [16]. El error entre la potencia de referencia y potencia medida en la salida de PMSG se envía al controlador PI para calcular el valor del ángulo de paso. Este sistema se muestra en la Figura 6.

6.2. Control lineal

El controlador más comúnmente usado en todos los equipos y procesos es el controlador PI o Proporcional-Integral. La acción de control es la suma de dos acciones, una es proporcional al error (la diferencia entre el valor deseado y el valor actual de la variable que se desea controlar) y la segunda es equivalente a la integral del error. La acción integral es utilizada para garantizar que el error en estado estable tenderá a cero, si no lo hace, el término integral hará que la acción de control continúe incrementándose. La parte proporcional es mayormente responsable a cambios rápidos en la variable controlada [9]. La principal idea es controlar la velocidad del generador variando la carga resistiva como entrada [17].

El control por ubicación de polos encuentra una ganancia *K* para retroalimentar los estados del sistema y para ubicar los polos en lazo cerrado en el lugar seleccionado [18], [19].

6.3. Control no lineal

Un tipo de estrategia de control no lineal es el control de modo deslizante que es un control robusto no lineal retroalimentado. Este puede ser utilizado en control de turbinas de viento. El control de modo deslizante puede ser utilizado en el diseño de observadores de estado, implementación de algoritmos avanzados de máquinas de corriente alterna por ejemplo como en control vectorial (*Field Oriented Control* en inglés) y en control directo de torque (*Direct Torque Control* en inglés) que requieren información de la posición del rotor y la velocidad.

Para ser específico, la posición del ángulo es utilizado para coordinar la transformación, mientras que la velocidad que se necesita en el control de velocidad de lazo cerrado como señal retroalimentada. Los métodos convencionales están basados en un transductor montado en la flecha del rotor. Sin embargo la presencia de tales sensores eléctricos incrementa los costos del sistema y la complejidad del hardware. Hay gran número de métodos de autosensado de la posición del rotor propuestas en la literatura, y los *observadores de modos deslizantes* (SMO, por sus siglas en inglés) es uno de los métodos más atractivos, los cuales han sido introducidos para estimar los parámetros de las máquinas de corriente alterna y su robustez a la variación de los parámetros donde la interferencia externa ha sido verificada [20]. Con la aplicación de SMO como base para el autosensado de la posición del rotor en control autosensado de la posición del rotor se pueden eliminar sensores.

6.4. Control inteligente

Algunas estrategias de control que han sido empleadas en turbinas de viento como técnicas de inteligencia artificial son lógica difusa, redes neuronales artificiales, computación evolucionaria, etcétera. Actualmente, estas técnicas son propuestas y utilizadas en turbinas de viento con transmisión [21].

La operación con velocidad variable en turbinas de viento con transmisión directa puede incrementar la captura de energía y reducir el ruido, las pérdidas de potencia y mejorar la eficiencia. Gran cantidad de sistemas de control de turbinas de viento necesitan equipos de medición para adquirir la información en tiempo real pero los sensores incrementan el costo y reducen la confiabilidad de todo el sistema. Las redes neuronales artificiales son utilizadas cuando se requiere mapeo de entrada-salida no lineal variante en el tiempo y obtener resultados en tiempo real en diferentes condiciones de operación y seleccionando diferentes algoritmos de aprendizaje, arquitectura de red, etcétera.

El uso de otras arquitecturas tiene el objetivo de proporcionar un alto desempeño, mayor eficiencia y mejor control.

Modelo del aerogenerador con generador síncrono de rotor devanado

En el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias se diseñó un sistema de control de un aerogenerador con un generador síncrono de rotor devanado que incluye el control de la orientación de

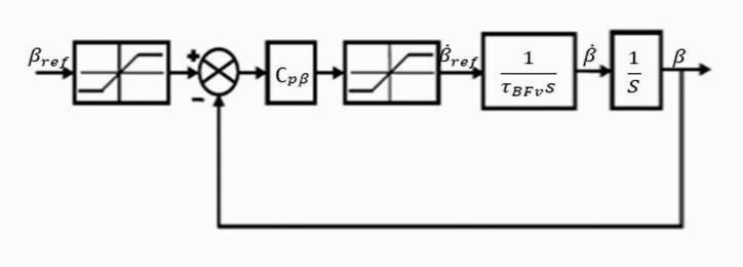


Fig. 6. Diagrama de bloques del controlador del ángulo de paso.

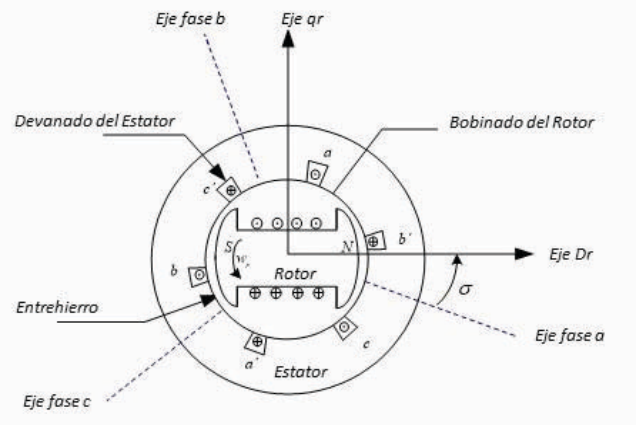


Fig. 7. Modelo de generador síncrono de rotor devanado utilizado en turbinas de viento [9].

la góndola, la turbina de viento, la excitación del generador, el rectificador y el inversor de potencia. En esta primera etapa este sistema es de control de ángulo de paso pero utilizando un modelo de generador síncrono de rotor devanado modelado en MatLab-Simulink a partir del modelo mostrado en la Figura 7.

El objetivo para una segunda etapa es aplicar este modelo con turbinas de viento de transmisión directa ya que hay algunas referencias que indican que los modelos de máquina síncrona bajo el sistema de referencia de bobinas pseudoestacionarias (dq0) pueden ser utilizados en dichas turbinas [22].

7. Conclusiones

El objetivo de este artículo es presentar algunas estrategias de control de turbinas de viento de transmisión directa. La mayoría de las estrategias de control desde el control clásico hasta el control inteligente es aplicado para generadores de imanes permanentes pero es importante conocer sus ventajas y desventajas técnicas, económicas y elementos ecológicos durante el diseño y considerar especialmente nuevas estrategias de control para turbinas de viento conectadas a generadores síncronos de rotor devanado.

Agradecimiento

Al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias.

Referencias

[1] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen, & B. Bak-Jensen, *Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*, RISO National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2001.

[2] R. Carriveau, *Advances in wind power*, Ed. Intech Press, 2012.

[3] T. Ackerman, *Wind power in power system*, Ed. John Wiley& Sons, USA/UK, 2012.

[4] L.O. Anaya,N. Jenkins, A. Ekanayake, P. Cartwrighy, & M. Hughes, *Wind energy generation modelling and control*, Ed. John Wiley& Sons, USA/UK, 2009.

[5] M. A. Khan, P. Pillay, & K. D. Visser, "On Adapting a Small PM Wind Generator for a Multiblade, High Solidity Wind Turbine," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, núm. 3, pp. 685-692, 2005.

[6] T. Al-Bahadly, *Wind turbines*, Intech Press. India, 2011.

[7] A. Aleksashkin, "Literature review on permanent magnet generators design and dynamic behaviour," *Research report* , núm. 77, 2008.

[8] H. Polinder, R. Van Rooij, A. S. MacDonald, & M. Mueller, "0MW Wind turbine direct-drive generator design witch pitch or active speed stall control," *Electric Machines&Drives Conference 2007 IEMDC´07,IEEE Press*, vol. 2, pp. 1390-1395, 2007.

[9] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkys, & E. Bossanyi, *Wind energy handbook*, John Wiley& Sons, USA/UK, 2009.

[10] R. Mukund, & P. E. Patel, *U.S. Merchant Marine Academy, Kings Point, New York,Wind and Solar Power Systems*,CRC Press, pp 101-104, 1999.

[11] G. E.Van Baars, "Wind turbine control design and implementation based on experimental models," *Proceedings of the 31st IEEE Conference on Proceedings of the Decision and Control*, vol. 2, pp. 2454-2459, 1992.

[12] F. E. Camacho, T. Samad, & M. Sanz-García, *The impacy of control Technology*, IEEECSS, 2011.

[13] L. A. Soriano, Y. Wen, & J. J. Rubio, "Modeling and control of Wind Turbine," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 13, article ID 982597, 2013.

[14] H. Polinder, F. Van der Pijl, G. Jan de Vilder, & P. Tavner, *Comparasion of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines*, IEEE Press, 2009.

[15] H. Polinder, "Overview and trends in wind turbine generator systems," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, 2011.

[16] H. Geng, G. Yang, D. Xu, & B. Wu, "Power Control for PMSG-Based WECS Operating Under Different Grid Conditions," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 26, núm. 3, pp. 822-830, 2011.

[17] M. Allagui, B. Q. Othman, & J. B. Hasnaoui, "Explotation of pitch control to improve the integration of a direct drive wind turbine to the grid," *Journal Electric Systems JES* , pp. 179-190, 2013.

[18] S. Sanchez, M. Bueno, E. L. A. Delgado, Y. Wen, & J. J. Rubio, "Optimal tuning of a controller in a Wind

Turbine Equipped with a permanent magnetized synchronous generator," *Energetica*, núm. 41, pp. 4960, 2009.

[19] K. J. Astrom, *Control Systems Design*, Lecture notes for ME 155A, Department of Mechanical and Environmental Engineering, University of California Santa Barbara, California, 2002.

[20] F. Li, *Robust Control Design, And Optimal Control Approach*, John Wiley & Sons, United States, 2007.

[21] K. D. Young, V. I. Utkin, & U. Ozguner, "A control engineer's guide to sliding mode control," *IEEE Trans. on Control System Technology*, vol. 7, núm. 3, pp. 328-342, 1999.

[22] P. Kundur, *Power Systems Stability and Control*, Ed. Mc. Graw Hill, p. 477, 1999.

PORTAL DE PORTALES LATINDEX
(PPL)

Acceso a contenidos y textos completos
de revistas académicas disponibles
en hemerotecas digitales
de América Latina,
el Caribe,
España y
Portugal

http://www.latindex.ppl.unam.mx/

Científica, vol. 21, núm. 1, pp. 25-34, enero-junio 2017.
eISSN en trámite, ISSN 1665-0654, ESIME Instituto Politécnico Nacional México

mHealth indispensable para la salud de los mexicanos

José Rodrigo **Espinoza-Bautista**[1]
Salvador **Álvarez-Ballesteros**[1]
Mario **Romero-Castro**[2]

[1]Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Zacatenco, Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos'
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Col. Lindavista, CP 07738, Ciudad de México.
MÉXICO.
[2]Servicios Axtel S.A. de C.V.
Avenida de los Insurgentes Sur 619, Col. Nápoles,
Delegación Benito Juárez, CP 03810. Cuidad de México.
MÉXICO.

correos electrónicos (email):
jose.rodrigo.esp@gmail.com
salvarezorama@gmail.com
mario.romero@axtel.com.mx

Recibido 17-05-2016, aceptado 20-09-2016.

Resumen

Dentro de las principales preocupaciones del gobierno mexicano, en el ámbito de la salud, se encuentra la Cobertura Universal de Salud, cuyo objetivo es garantizar que todos los mexicanos tengan los servicios de salud a su alcance y a un costo sostenible, por otra parte, es importante mencionar que, de acuerdo a las tendencias en el sector de la salud, la atención debe ser personalizada y preventiva. Por lo cual, es necesario buscar una solución integral dentro del sistema de salud que sea capaz de otorgar esa atención individualizada y oportuna en cualquier lugar del país. En la búsqueda de esta solución, en países desarrollados han surgido términos como eHealth y mHealth como una solución adecuada para los actuales cuidados de salud.

El término mHealth emergió como una rama importante de eHealth para la atención médica a distancia mediante dispositivos móviles. El concepto mHealth tiene ventajas sobre los métodos tradicionales de cuidado de la salud, seguimiento médico y tratamiento de enfermedades, ya que la atención médica puede ser impartida no solo en las zonas urbanas sino también en zonas suburbanas y zonas de difícil acceso.

Lo anterior nos lleva a pensar que mHeatlh puede ser una alternativa de salud en México, por ello urge que grupos, tanto de las áreas Medico-Biológicas, como de las áreas de Ingeniería se interesen en crear equipos de trabajo para desarrollar tecnología propia que ayude a mejorar el sector salud de México para beneficiar a la población. Por ello el objetivo de este trabajo es analizar los campos de acción dentro del sistema de salud mexicano y de esta manera realizar propuestas para la implementación de eHealth y mHealth en México.

Palabras clave: mHealth, eHealth, salud digital, telemedicina, dispositivos móviles.

Abstract (mHealth Essential for the Health of Mexicans)

Among the main concerns of the Mexican government, in the area of health, is the Universal Health Coverage, whose objective is to ensure that all Mexicans have health services within their reach and at a sustainable cost, besides this, it is important to mention that according to the trends in the health sector, healthcare must be personalized and preventive. Therefore, it is necessary to find an integral solution within the health system that is capable of providing that individualized care anywhere in the country. In pursuit of this solution, terms such as eHealth and mHealth have emerged in developed countries as a suitable solution for current health care.

The term mHealth emerged as an important eHealth branch for remote medical care through mobile devices. The concept mHealth has advantages over traditional methods of health care, medical monitoring and treatment of diseases, since medical care can be delivered not only in urban areas but also in areas difficult to access.

This leads us to think that mHeatlh may be a health alternative in Mexico, so it is urgent that groups, both Medical-Biological areas and Engineering areas get interested in creating work teams to develop their own technology that will help improve the health sector in Mexico to benefit the population. Therefore, the objective of this work is to analyze the fields of action within the Mexican health system and in this way, make proposals for the implementation of eHealth and mHealth in Mexico.

Index terms: mHealth, eHealth, salud digital, telemedicina, dispositivos móviles.

1. Introducción

Antes que las palabras eHealth y mHealth llegarán al vocabulario de la comunidad científica existieron esfuerzos previos por hacer llegar los cuidados médicos más allá de un hospital o consultorio médico. Pero desde la entrada en escena del término mHealth ha significado una solución en el campo de la salud, no solo por su promisorio futuro dentro de los cuidados médicos a distancia, sino también por ponernos a un paso más cerca de la cobertura universal de salud, pero ¿a que nos referimos con el termino mHealth? Este término se define por la *Global Observatory of eHealth* (GOe) y refiere a:

> "La práctica médica y de salud pública apoyada por dispositivos móviles, tales como teléfonos móviles, dispositivos de monitorización de pacientes, asistentes digitales personales y otros dispositivos inalámbricos" [1].

En México ya han existido esfuerzos para implementar mHealth pero estos intentos no han sido de gran impacto debido a que sin el desarrollo de tecnología de última generación no es factible que se pueda trabajar en "sistemas de mHealth integrales" que puedan beneficiar a la población.

Entre las tecnologías de última generación que pueden ser utilizadas para el desarrollo de mHealth se encuentran las siguientes:

- La Red de Área Corporal Inalámbrica (WBAN por sus siglas en inglés) [2] [3] ha aparecido como una tecnología de última generación de las Redes de Área Personal Inalámbricas (WPAN por sus siglas en inglés). WBAN es una colección de nodos de sensores heterogéneos situados en el cuerpo que están vinculados a un dispositivo concentrador como la unidad de procesamiento de datos.
- Realidad virtual [4] se utiliza en muchas aplicaciones que van más allá de la ingeniería. Así, durante años, ha sido un factor esencial para la industria del juego y entretenimiento. El día de hoy, la realidad virtual se ha abierto camino en la industria de las ciencias de la vida, como herramienta para la investigación médica, educación y cuidados al paciente.
- La nube informática (*Cloud Computing*) [5] es una tecnología la cual nos permite acceder un conjunto compartido de recursos informáticos configurables (por ejemplo, redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios) bajo demanda y por un pago por uso.
- *Long Term Evolution* (LTE) [6] y LTE-Advanced [7] [8]: sistemas de comunicación móvil enfocados en una mayor capacidad y velocidad de transmisión mediante características como el esquema de transmisión, la adaptabilidad, la coordinación interceldas, y los esquemas de multiantena, entre otras. La necesidad de evolucionar de LTE a LTE-Advanced (LTE Release10) era proveer velocidades de bits más altas de una manera rentable y, al mismo tiempo, cumplir plenamente los requisitos establecidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para el estándar *International Mobile Telecommunications-Advanced* (IMT-Advanced), también conocida como como la cuarta generación de tecnología inalámbrica de comunicaciones móviles (4G).

Dentro de las principales aplicaciones [9] que se le han dado a mHealth se encuentran las siguientes:

- Teleducación.
- La recolección de datos vía remota.
- Monitoreo remoto.
- Comunicación y la formación de trabajadores de la salud.
- Seguimiento de enfermedades y brotes epidémicos.
- Soporte de diagnóstico y tratamiento.

Por otro lado, se debe señalar que mHealth necesita de una reeducación para su uso, ya que, esta requerirá un cambio de mentalidad y comportamiento hacia el nuevo sistema de salud en beneficio de la población.

2. Antecedentes de mHealth

En esta sección se hace una revisión de los antecedentes acerca de la salud a distancia. Se inicia con un término que revolucionó la escena de los cuidados médicos, este término es la Telemedicina.

La *American Telemedicine Association* (ATA) define a la Telemedicina (*Telemedicine*) [10] como:

> "El uso del intercambio de la información médica de un sitio a otro a través de comunicaciones electrónicas para mejorar el estado de salud de un paciente".

Desde que emergió el término de Telemedicina hace más de 40 años, enfoco sus trabajos en la prestación de servicios de diagnóstico y vigilancia de la salud de los pacientes que viven en zonas de difícil acceso.

A medida que el modelo del sistema de salud iba creciendo los cuidados de la salud, así como la gestión de tratamiento de la enfermedad llegaron a ser parte de la misma solución, fue así como el término de Telesalud (*Telehealth*) [10] surgió. El cual es definido por la ATA como:

> "El uso del intercambio de la información médica de un sitio a otro a través de comunicaciones electrónicas para controlar, mantener o mejorar el estado de salud de un individuo".

La integración de diversos medios de comunicación e información en un solo sistema alrededor de las computadoras como lo son las telecomunicaciones, videoconferencia y transmisión de datos en tiempo real ha revolucionado la telemedicina, debido a esto ha surgió un nuevo termino en la escena de la telemedicina, este es eHealth (*electronic Health*), la Organización Mudial para la Salud (OMS) define a la eHealth [11] como:

> "El uso de tecnologías de información y comunicación (TIC) para la entrega o mejora del cuidado de la salud. A grandes rasgos, la eHealth se trata de mejorar el flujo de información, a través de medios electrónicos, para apoyar la prestación de servicios de salud y la gestión de los sistemas de salud".

Aunque la idea de eHealth ya había sido puesto sobre la mesa desde los sesenta por medio de la idea de los Expedientes Clínicos Electrónicos (*Electronic Health Record*, eHR) [12], no fue hasta el comienzo de los noventas que esta idea fue considerada de manera más seria, esta sucedió cuando el *United States Institute of Medicine* (IOM) sugirió la adopción de expedientes electrónicos que puedan ser almacenados en computadoras. Hoy en día, eHR proporciona un registro completo de los pacientes y simplifica el trabajo de las instituciones médicas.

Con la introducción de eHealth se confirma que los usos de las TIC están siendo continuamente integradas a los sistemas y servicios de salud en todo el mundo, en los últimos años ha aparecido una nueva rama de eHealth la cual cuenta con sus mismas características, pero ahora con la inclusión de dispositivos móviles, este nuevo termino fue denominado como mHealth (*mobile Health*).

Uno de los primeros investigadores que acuño el término mHealth fue Istepanian. Él indico que este nuevo termino incorpora de manera extensa la utilización de las nuevas tecnologías de telecomunicaciones, así como las tecnologías de última generación de comunicaciones móviles a los sistemas de salud [13], posteriormente definió a la mHealth [11] como:

> "Las tecnologías de computación móvil, sensores médicos, y las comunicaciones para el cuidado de la salud".

Es a partir de aquí, que mHealth se ha convertido en un término en el vocabulario de muchos investigadores no solo del campo de la salud sino también de la mecánica, telecomunicaciones, sistemas de información, entre otros, ya que, para estos investigadores el desarrollo e investigación en mHealth presenta un prometedor futuro en el ámbito de la salud pública.

Entre las ventajas que pueden ser proporcionadas por mHealth se encuentran:

- Mejoras en el diagnóstico, seguimiento y prevención de las enfermedades.
- Agilización de los resultados.
- Mayor accesibilidad.
- Atención personalizada.
- Incremento en la calidad del servicio.
- Sus herramientas nos permiten comunicar en momento preciso para llegar hasta salvar una vida.

3. mHealth en México

Existe un gran interés por parte de los países desarrollados en implementar sistemas de mHealth por las grandes ventajas que presenta este nuevo modelo, por lo cual, cabría preguntarse, ¿qué está haciendo México con respecto a esta nueva tendencia en los cuidados de la salud?

En esta sección se realizará una revisión del estado de desarrollo de mHealth en México, de esta manera, hacer un análisis de la necesidad de la investigación en el ámbito de la salud móvil.

Para iniciar es importante saber que, de acuerdo a la última lista llamada Índice de Desarrollo de las TIC (*ICT Development Index IDI*) [14] que utiliza la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) para evaluar los niveles de acceso a las tecnologías de la información y la comunicación, la utilización de esas tecnologías y los conocimientos en la materia (El valor IDI es calculado tomando en cuenta 11 indicadores que evalúan los tópicos mencionados previamente y al realizar ciertos cálculos se obtiene este valor). En la Tabla 1 se observa que México se encuentra en el lugar 95 dentro de 167 países evaluados en los rubros antes mencionados.

La Tabla 1 también muestra una comparación del IDI del 2010 y el IDI del 2015 en la cual se observa que México se ha rezagado en el uso de las TIC con respecto al año 2010. Esto nos indica que las TIC no están siendo utilizadas de manera adecuada, lo cual, puede afectar al impulso del uso de mHealth. Si se analiza de manera local la utilización de las TIC en México, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en su *Boletín* número 131/16 del 2016 acerca de los usos de las TIC en México [15] menciona que entre los principales usos que México le da al internet (uno de los

Tabla 1. Índice de Desarrollo de las TIC (IDI).

Puesto en IDI 2015	Economía	Valor IDI 2015	Puesto en IDI 2015	Valor IDI 2010
1	Korea (Rep.)	8.93	1	8.64
2	Denmark	8.88	4	8.18
3	Iceland	8.86	3	8.19
4	United Kingdom	8.75	10	7.62
…	…	…	…	…
90	Ecuador	4.81	90	3.65
91	Iran (I.R.)	4.79	99	3.48
92	Jordan	4.75	84	3.82
93	Tunisia	4.73	93	3.62
94	Albania	4.73	89	3.65
95	Mexico	4.68	86	3.70
96	Cape Verde	4.62	107	3.14
97	Kyrgyzstan	4.62	112	3.02
98	Philippines	4.57	105	3.16
99	Morocco	4.47	96	3.55

principales indicadores de la utilización de las TIC) fijo o móvil, no se encuentra el sector salud. En la Figura 1 se observan los usos que se le da al Internet en México.

Como se puede observar en la Figura 1, la salud no es uso que se le dé a internet, aunque podría aparecer algún uso en los demás rubros, no existe un uso en específico para el sector salud. Pero si realizamos un análisis más profundo en los usos, se observa que la búsqueda de información, los contenidos audiovisuales, la educación y la interacción con el gobierno son usos que, 'sí' se le dan a internet, esto nos muestra que, la utilización de mHealth puede ser posible ya que dentro de los sistemas de mHealth se realizan actividades que el mexicano ya realiza, solo que en otros ámbitos de su vida.

Continuando con el estudio, si se observa el avance de México en el campo de mHealth, en el informe llamado *Atlas: eHealth country profiles 2015* [16] de la Organización Mundial de la Salud (OMS) indica que en México existen programas de mHealth, sin embargo, son apenas intentos de aplicar este modelo de salud. En la Tabla 2 se pueden observar los programas mHealth evaluados por la OMS y su nivel de desarrollo.

Para la Tabla 2 se tiene que:

Intermedio, se refiere a que es utilizado solo en algunos centros de salud, hospitales públicos y privados.

Nacional, se refiere a que es utilizado en todos los hospitales públicos y privados, laboratorios e institutos de salud.

Local, se refiere a que es utilizado en centros de salud que proveen cuidados básicos de salud.

Establecido, se refiere a que el programa está en curso y que se ha llevado a cabo durante un mínimo de 2 años y está previsto que continúe.

Piloto, se refiere a que el programa está siento probado y evaluado.

Informal, se refiere a que el programa se utiliza, pero en ausencia de procesos y políticas formales

Sin respuesta, se refiera a que el país encuestado no respondió la pregunta.

Si se analizan los datos mostrado en la Tabla 2 se puede observar que México ha trabajado poco en el desarrollo en programas de mHealth ya que un signo inequívoco de que no

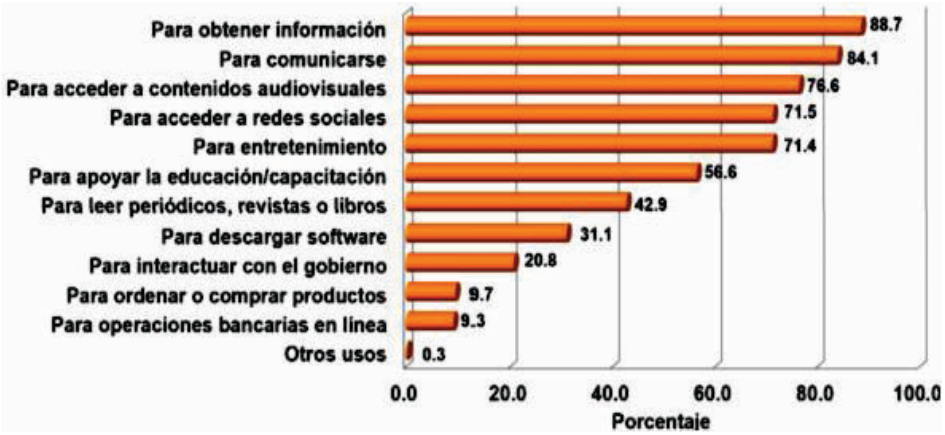


Fig. 1. Usuarios de Internet por tipo de uso.

Tabla 2. Programas de mHealth evaluados por la OMS a México.

Acceso/Entrega de servicios de salud	**Nivel del Sistema de Salud**	**Tipo de Programa**
Llamadas gratuitas de emergencias	Intermedio	Establecido
Call centers para la salud	Nacional	Establecido
Recordatorios de citas	Nacional	Establecido
Telemedicina Móvil	Local	Piloto
Manejo de desastres y emergencias	Sin Respuesta	Sin Respuesta
Seguimiento de tratamientos	Sin Respuesta	Sin Respuesta
Acceso/Entrega de información de salud	**Nivel del Sistema de Salud**	**Tipo de Programa**
Movilización de la comunidad	Sin Respuesta	Sin Respuesta
Acceso a la información (Bases de datos y herramientas)	Sin Respuesta	Sin Respuesta
Expedientes médicos	Sin Respuesta	Sin Respuesta
mLearning	Sin Respuesta	Sin Respuesta
Sistemas de Apoyo	Sin Respuesta	Sin Respuesta
Recolección de información Médica	**Nivel del Sistema de Salud**	**Tipo de Programa**
Monitoreo de los pacientes	Intermedio	Piloto
Encuestas de salud	Sin información	Sin información
Vigilancia de enfermedades	Intermedio	Informal

se ha trabajado es la falta de una respuesta en la mayoría de los programas evaluados y si a esto se suman los programas locales y piloto, es posible decir que es necesario investigar, trabajar e implementar programas de mHealth en el sistema de salud. Si comparamos estos resultados con los de Estados Unidos de América, se tiene que en este país la mitad de estos programas son establecidos a nivel nacional. La evaluación de mHealth para Estados Unidos se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Programas de mHealth evaluados por la OMS a Estados Unidos de América.

Acceso/Entrega de servicios de salud	**Nivel del Sistema de Salud**	**Tipo de Programa**
Llamadas gratuitas de emergencias	Nacional	Establecido
Call centers para la salud	Nacional	Establecido
Recordatorios de citas	Sin Respuesta	Sin Respuesta
Telemedicina Móvil	Nacional	Establecido
Manejo de desastres y emergencias	Sin Respuesta	Sin Respuesta
Seguimiento de tratamientos	Sin Respuesta	Sin Respuesta
Acceso/Entrega de información de salud	**Nivel del Sistema de Salud**	**Tipo de Programa**
Movilización de la comunidad	Sin Respuesta	Sin Respuesta
Acceso a la información (Bases de datos y herramientas)	Sin Respuesta	Sin Respuesta
Expedientes médicos	Nacional	Establecido
mLearning	Nacional	Establecido
Sistemas de Apoyo	Nacional	Establecido
Recolección de información Médica	**Nivel del Sistema de Salud**	**Tipo de Programa**
Monitoreo de los pacientes	Nacional	Establecido
Encuestas de salud	Sin información	Sin información
Vigilancia de enfermedades	Sin información	Sin información

Por otra parte, la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) en su reporte "Estudios de la OCDE sobre los Sistemas de Salud: México[17]" del 2016 indica que el sistema de salud en México debe cambiar para brindar una atención de alta calidad enfocada en las personas más que en los acuerdos institucionales históricos, además de que la atención debe ser capaz de ofrecer atención preventiva y personalizada toda vez que cuente con un costo efectivo y sostenible. Sin embargo, en muchos aspectos, el Sistema de Salud en México no se está desempeñando como debería. Asimismo, indica que dentro de la OCDE existen muchos ejemplos que puede tomar para mejorar.

Entre sus apartados, la OCDE indica que se necesita una evaluación más efectiva de las tecnologías de la salud para todo el Sistema de Salud mexicano, además de pedirle al Centro Nacional de Excelencia Tecnológica (CENETEC) construir y asumir un papel más amplio en la producción de tecnologías sanitarias.

La OCDE hace referencia a la CENETEC, ya que, es esta institución quien debe asumir la responsabilidad de la implementación de las nuevas tecnologías en el sector salud, por lo cual, es necesario conocer más de esta institución y saber en que trabajan para dar respuesta a los requerimientos de la OCDE.

El Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud (CENETEC-Salud) [18], es un órgano desconcentrado de la Secretaría de Salud que surgió para satisfacer las necesidades de gestión y evaluación de Tecnologías para la Salud en México. El CENETEC-Salud enfoca su trabajo en 4 campos prioritarios:

- Evaluación de Tecnologías para la Salud
- Guías de Práctica Clínica
- Gestión de Equipo Médico
- Telesalud

El programa de Telesalud enfoca sus esfuerzos en las personas que habitan en localidades de difícil acceso en donde no hay un servicio integral de atención médica.

Dentro de las investigaciones que ha realizado esta institución se encuentran:

- La Telepresencia
- El Telemonitoreo
- La Teleconsulta Psiquiátrica
- La Teleeducación

Los esfuerzos del CENETEC-Salud son muy plausibles, pero se advierte que en el ámbito de la mHealth aún hay trabajo que realizar si se aspirar a tener programas consolidados como Estados Unidos.

Al analizar los informes mostrados se observa que mHealth es un campo no desarrollado completamente en México, por lo cual es un menester que exista investigación tecnológica urgentemente por parte de la comunidad científica del país en este campo.

4. Posibilidades de uso de mHealth en el sector salud de México

Como ya fue advertido, México tiene muchas deficiencias con respecto a mHealth, pero ¿es de utilidad implementar programas y sistemas de este rubro en el sector salud en México?

En esta sección se analizan los campos donde podría ser de utilidad poner en marcha programas o sistemas de mHealth dentro del sector salud público en México.

Para comenzar se hace una revisión de las principales causas de muerte en México para observar si mediante el monitoreo y la asistencia médica a distancia por medio de dispositivos móviles se pueden combatir algunas de esas causas de muertes.

De acuerdo al reporte del 2016 del INEGI la mayor causa de mortalidad en México[19] son las enfermedades del corazón (entre los cuales no se encuentran los paros cardiacos), a continuación aparecen la diabetes mellitus y a los tumores malignos. En la Tabla 4 se completan las principales causas de muerte en México.

En la actualidad el seguimiento médico se realiza en un consultorio apoyado con medicamentos y algunos dispositivos, pero aun así es necesario acudir al consultorio para que el médico revise los avances del tratamiento. Hoy en día, basa-

Tabla 4. Causas de muerte en México (Todas las edades, todos los sexos).

Núm.	Causas	Defunciones
	Total	633,641
1	Enfermedades del corazón	121,427
	Enfermedades isquémicas del corazón	82,334
2	Diabetes mellitus	94,029
3	Tumores malignos	77,091
4	Accidentes	35,815
	De tráfico de vehículos de motor	15,882
5	Enfermedades del hígado	34,444
	Enfermedad alcohólica del hígado	11,411
6	Enfermedades cerebrovasculares	33,166
7	Influenza y neumonía	20,55
8	Agresiones	20,01

do en los últimos avances de la tecnología ya existen dispositivos portátiles que pueden monitorear o detectar algunos de los signos o síntomas representativos de las afecciones mencionadas, por ejemplo, hay sensores de presión arterial, pulso, temperatura corporal, medidores de glucosa, estos sensores son capaces de enviar información a algún centro médico para recibir una interpretación de ellos y esto es posible desde cualquier lugar con una conexión a internet o una red móvil.

Otra utilidad que se puede dar a mHealth es el aprendizaje a distancia [20] donde la enseñanza y formación de los futuros médicos se puede hacer vía remota. Además de la asistencia a la enseñanza, donde la enseñanza convencional será apoyada o sustituida por tutoriales, realidad virtual, dispositivos móviles entre otros medios.

Dentro de este tópico se encuentra un término muy útil para los fines de esta investigación, es la llamado Alfabetización de eHealth y mHealth la cual es definida como:

> "La capacidad de buscar, encontrar, comprender y evaluar información de salud a partir de fuentes electrónicas y aplicar los conocimientos adquiridos para abordar o resolver un problema de salud" [21].

Mediante la alfabetización de eHealth y mHealth los doctores en lugares remotos podrán tener acceso a la información necesaria para hacer un diagnóstico adecuado a las personas que asistan con él. Esto es algo muy útil si es comparado con lo que hoy pasa en poblaciones lejanas ya que, aunque los doctores tienen literatura para sus diagnósticos esta no es suficiente para detectar enfermedades difíciles de evaluar y atender.

Para concluir se analiza el campo de la administración y gestión de información vía remota, ya que existen tantos tramites o procesos que se realizan directamente en los centros médicos algo que es una pérdida de tiempo para la mayoría de la población debido a la falta de organización y a veces hasta un mal servicio por parte del personal administrativo. Sería de gran ayuda que todos esos trámites pudieran ser realizarse a distancia y de manera ágil.

Además, es importante mencionar que es necesario migrar toda la información a plataformas digitales donde pueda ser consultada en cualquier punto del país con el uso de dispositivos móviles para un acceso a ella de manera más sencilla.

Como se puede inferir a partir de los tópicos tratados, existen campos los cuales se podría mejorar si se utilizará mHealth. En síntesis, se observa que sería de gran utilidad el implementar mHealth en el sector salud en México y al mismo tiempo, sería una oportunidad para atacar el rezago tecnológico que persiste en el sistema de salud público.

5. Sugerencias para el uso mHealth en el sistema de salud mexicano

Es necesario recordar que uno de los principales problemas que atiende el gobierno de México es la cobertura universal de salud y si a esto agregamos que también es necesario establecer programas de salud integral, la posible introducción de soluciones de mHealth al sector salud mexicano sería un paso muy grande para llegar a estos objetivos por su movilidad y la versatilidad en aplicaciones que nos provee ese modelo.

Para la resolución de algunos de los problemas mencionados previamente se pueden utilizar sistemas de mHealth. Las tecnologías utilizadas en mHealth han resultado muy útiles para la administración, gestión, monitoreo y los cuidados de la salud. Pero introducir estas nuevas tecnologías al sistema de salud de México no será una tarea sencilla, esto debido al rezago presentado en las instituciones de salud pública.

Las sugerencias que se presentarán solo abordarán los tres campos de acción mencionados en la sección anterior, estas son:

- Gestión y administración de la información.
- Educación a distancia.
- Monitoreo y atención médica móvil.

5.1. Gestión y administración de la información

Es mucha la información manejada (trámites, citas, expedientes clínicos, informes, requisiciones, entre otras fuentes de información) dentro del sistema de salud mexicano, pero esta no solo deber estar almacenada de forma adecuada para su fácil acceso sino también debe estar segura de posibles malos usos o robos. Una de las nuevas tecnologías que se pueden emplear para la mejora del manejo de la información, que al igual que en todos los procesos anteriores se puede usar la nube informática (Cloud Computing), mediante esta tecnología se puede almacenar grandes cantidades de información y es posible acceder de manera sencilla a ella, con autorización previa. El uso de la nube nos permitirá acceder a la información deseada desde cualquier parte del mundo con una conexión a internet o una red móvil como la red LTE, otra tecnología de última generación que se utilizaría para esta reestructuración.

Dentro de la nube se propone el almacenamiento de los expedientes clínicos electrónicos de cada usuario, de manera que, si el usuario se enferma o tiene problemas médicos en algún lugar donde no tenga cobertura médica o la institución nacio_

nal o extranjera que lo atienda no tenga ningún registro del mismo, esta institución pueda consultar su historial clínico para evitar perder tiempo en caso de que su urgencia se deba a algún padecimiento previo. También podrá existir la posibilidad que los laboratorios puedan enviar los resultados de estudios al expediente clínico electrónico del usuario, de manera que, cualquier médico autorizado podrá analizar los resultados y proveer un diagnóstico. Dicho expediente que se genera será un Expediente Clínico Electrónico Personalizado Universal (ECEPU).

Regresando a la tecnología LTE mencionada previamente e integrando a los teléfonos inteligentes es posible la implementación de una aplicación donde se puedan realizar trámites y búsquedas de información sin la necesidad de acudir a la institución de salud. Algunas acciones que se pueden realizar son las siguientes:

- Generar, consultar y cancelar citas médicas.
- Recuperar recetas médicas.
- Realizar trámites administrativos.
- Llamar a emergencias
- Localizar hospitales o clínicas.
- Revisar existencia de medicamentos.

En caso de no contar con un teléfono inteligente, se podría desarrollar un sistema de mensajes de texto con el fin de proporcionar las funciones básicas con las que cuenta la aplicación.

5.2. Educación a distancia

Con respecto a la educación a distancia, la creación de universidades o centros de estudios virtuales para la enseñanza de medicina y enfermería que proveerían de profesionales de la salud a las rancherías, pueblos y municipios remotos. No necesariamente toda la educación se impartiría de manera remota, pero si la gran parte de ella, dejando la práctica y algunos otros tópicos importantes sean impartidos en el centro médico o universidad más cercana.

Dentro de la educación a distancia también existe un rubro conocido como alfabetización de eHealth y mHealth en donde se proponen plataformas virtuales para que un médico, vía remota y mediante un dispositivo móvil, pueda acceder a libros, textos con orientados al diagnóstico de enfermedades, enlaces con universidades especializadas, farmacéuticas entre otras fuentes de información que puedan ayudar a realizar un diagnóstico adecuado junto con su respectivo tratamiento.

Finalmente apoyar todo esto con tutoriales, plataformas web y dispositivos de realidad virtual para una mejor preparación de los futuros médicos. Las aplicaciones de la realidad virtual en un entorno hospitalario (véase Fig. 2) son tantas que el desarrollo de dispositivos especializados y de aplicaciones enfocadas al mundo de la salud integral la cual comienza ya a tener un peso relevante en el sector, gracias a las tecnologías innovadoras.

5.3. Monitoreo y asistencia médica

Para concluir esta sección se realiza una propuesta mediante la cual es posible utilizar mHealth para el monitoreo y asistencia médica de la población a distancia. Los dispositivos de última generación para el cuidado de la salud a distancia tienen precios elevados, por lo cual, la finalidad principal de esta propuesta es poder realizar un sistema de monitoreo y asistencia médica de bajo costo para que pueda ser implementado en un sistema de salud público.

En esta propuesta se utiliza la tecnología de última generación, esta es la WBAN, mediante esta se puede realizar una red de sensores en el cuerpo de un individuo para monitorear ciertas funciones fisiológicas del paciente.

A grandes rasgos, el dispositivo funcionaria de la siguiente manera: una red WBAN estará monitoreando los signos vitales de una persona, mientras estos permanezcan estables el dispositivo periódicamente tomará muestras de ellos y se enviarán al expediente médico electrónico del paciente en los servidores del hospital o en la nube para un acceso universal, con el consentimiento del dueño de la información.

Si existe una emergencia médica, se enviará un mensaje de emergencia que contará con la localización, los signos vitales e información personal, de manera que el hospital pueda enviar un equipo de emergencia inmediatamente con el instrumental y dispositivos necesarios para que la asistencia a la persona sea más ágil, es decir, que dependiendo de la información recibida mediante el mensaje de emergencia, la unidad

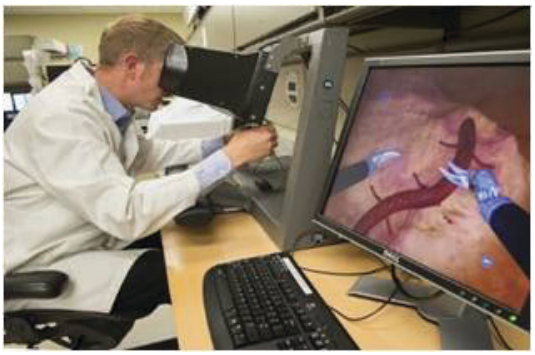


Fig. 2. Realidad virtual en la educación de la medicina.

médica sabrá que se requiere para atender de forma eficaz el problema que tiene el individuo. La Figura 3 muestra cómo funcionaría este dispositivo.

6. Seguridad en eHealth y mHealth

La información manejada en el sistema de salud es muy sensible y privada como lo son los expedientes clínicos electrónicos, resultados de análisis, tratamientos o recetas expedidas, por lo que es necesario que, a la par de esta propuesta se implemente un sistema de protección a la información.

Entre los requerimientos con respecto a la privacidad de la información se encuentran los siguientes:

- La información debe estar solo disponible para personal autorizado.
- Deben existir estrictas pólizas de acceso a la información.
- Los equipos donde se almacena la información deben tener una protección para evitar el robo de la misma.
- Los dispositivos móviles no deben almacenar información o esta deberá estar encriptada.
- Adaptarse a las normas de privacidad y seguridad informática establecidas por los estándares nacionales e internacionales.

Aunque no están bien especificados los requerimientos de seguridad para mHealth, se ha estado trabajando para estandarizar los requerimientos de seguridad, entre los primeros países que empezaron fue Estados Unidos desde la creación del documento llamado "Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA)[22]: Privacy Rule" pero no fue recibida de buena forma por la comunidad científica aunque en muchos de los trabajos acerca de seguridad en mHealth se basan en ella.

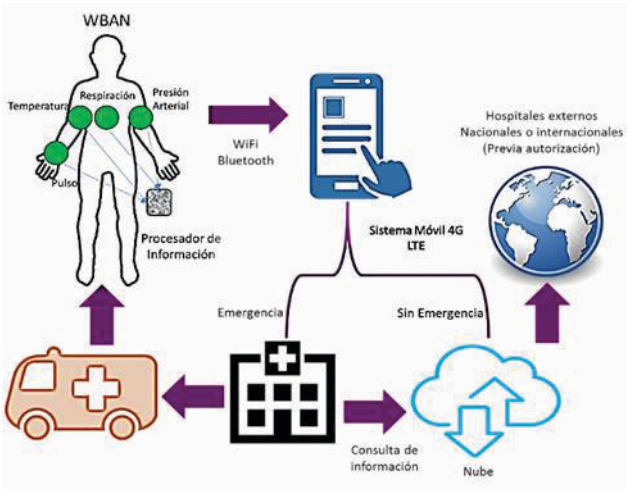


Fig. 3. Modelo del sistema monitoreo y asistencia médica personalizado.

Para el sector salud en México también ha sido tema la seguridad, el CENETEC-Salud expresa que la seguridad [23] de mHealth utilizada dependerá de la tecnología utilizada, de los pocos aspectos de seguridad que si especifica el CENETEC es la protección de los expedientes clínicos electrónicos mediante a la norma mexicana NOM-204-SSA3-2012, también remarca que la seguridad en los datos se lleva a cabo con firmas electrónicas y certificados digitales, además de tomar como referencia las propuestas hechas por la HIPPA. Pero en general, no propone un sistema de seguridad de datos integral.

Como parte de la propuesta presentada en este artículo de investigación, se han considerado sistemas de seguridad para la información desde su recolección, el almacenamiento, hasta la consulta y uso de los datos. La mayoría estarán basados en los conceptos propuestos por la HIPAA, pero también se generarán algoritmos de encriptado que puedan ser ejecutados de manera ágil en los dispositivos móviles, además de la creación una llave única para cada usuario mediante la cual el paciente y el médico puedan acceder a su expediente clínico electrónico en cualquier sitio.

7. Conclusiones

México no es un país acostumbrado a utilizar la tecnología móvil en el sector salud, por lo cual, será necesario bregar con los paradigmas de salud que se establecieron en México, por ejemplo, se tiene la creencia que para dar seguimiento a un tratamiento es necesario ver directamente al doctor en su consultorio, algo con mHealth no sería necesario. Además, es importante señalar que las deficiencias que presentaría este modelo al implementarse no serían en las aplicaciones sino en el retraso tecnológico que existe en el país.

Pero mHealth se presenta como una respuesta adecuada al problema de la cobertura universal de salud porque al utilizar las redes móviles este sería capaz de llegar a los lugares de difícil acceso y proveer de atención médica a todos esos pueblos remotos, no solo en por medio de diagnósticos y tratamientos sino también por la generación de profesionales de salud en ese sitio.

Mediante la inclusión de las nuevas tecnologías de información y comunicación al sector salud público, también se garantizaría un tratamiento de la información más ágil y de más sencillo acceso a ella. Sin olvidar la generación de un sistema de seguridad en la información, el cual, no podrá ser cualquier tipo de seguridad, este sistema necesita una privacidad y se-

guridad de alto nivel para mantener segura la información aun en caso de robo.

La cobertura universal de salud y la salud integral se verían más cerca de ser una realidad si se implementarán programas y sistemas de mHealth en México. Por este motivo, la investigación, el desarrollo y la implementación de programas y sistemas de mHealth en México es una apuesta que se tiene que hacer para que con esto se pueda ir de programas de telesalud a programas y sistemas de eHealth y mHealth.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional y a la Sección de estudios de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado.

Referencias

[1] M. Kay, "mHealth: New Horizons for Health through Mobile Technologies," *World Heal. Organ.*, vol. 3, pp. 66-71, 2011.

[2] Y. Shi, "Smartphone Based Body Area Network System," *2014 Int. Conf. Med. Biometrics*, pp. 204-209, 2014.

[3] S. Sarkar, & S. Misra, "From Micro to Nano: The Evolution of Wireless Sensor-Based Health Care.," *IEEE Pulse*, vol. 7, no. 1, pp. 21-25, 2016.

[4] J. Edwards, "Telepresence: Virtual Reality in the Real World," *IEEE Signal Process. Mag.*, pp. 9-13, noviembre 2011.

[5] P. Mell, & T. Grance, "The NIST definition of cloud computing," *NIST Spec. Publ.*, vol. 145, p. 7, 2011.

[6] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, "LTE Radio Access," in *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*, Elsevier, 2014, pp. 103-119.

[7] T. Ali-Yahiya, "Understanding LTE and its Performance," *Int. J. Inf. Learn. Technol.* vol. 53, núm. 9, 2011.

[8] S. C. Yang, & P. Winter, "LTE-Advanced and IEEE 802.11ac," *Int. J. Inf. Learn. Technol.*, vol. 32, núm. 4, pp. 221-234, agosto 2015.

[9] Vital Wave Consulting, "mHealth for Development: The Opportunity of Mobile Technology for Healthcare in the Developing World," *Technology*, vol. 46, núm. 1, pp. 1-70, 2009.

[10] D. Malvey, & D. J. Slovensky, *mHealth*, vol. 1. Boston, MA: Springer US, 2014.

[11] R. Istepanian, S. Laxminarayan, & C. S. Pattichis, *M-Health*, 2006.

[12] World Health Organization, "Building eHealth Progress of Member States," *Glob. Obs. eHealth Ser.,* p. 339, 2006.

[13] R. S. H. Istepanian, & J. C. Lacal, "Emerging mobile communication technologies for health: some imperative notes on m-health," *Proc. 25th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc*. 2003, vol. 2, no. 954, p. 1414-1416 Vol.2, 2003.

[14] ITU, "The ICT Development Index 2015," IDI Ranking, 2015. [Online]. Available: http://www.itu.int/net4/ITU-D/idi/2015/#idi2015countrycard-tab&MEX. [Consultado: 01-Sep-2016].

[15] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Encuesta Nacional sobre disponibilidad y uso de tecnologías de la información en los hogares," Comun. Soc. - Boletín prensa Núm. 131/16, 2016.

[16] W. H. Organization, "Atlas. eHealth country profiles," WHO, Geneva, 2010.

[17] Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos, *OECD Reviews of Health Systems: Mexico 2016*. OECD Publishing, 2016.

[18] CENETEC, Serie Tecnologías en Salud: Volumen 3: Telemedicina. 2011.

[19] INEGI, "Estadísticas de Mortalidad," 2016. [Online]. Available: http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/registros/vitales/mortalidad/tabulados/ConsultaMortalidad.asp. [Consultado: 03-Sep-2016].

[20] A. Gaddi and F. Capello, eHealth, *Care and Quality of Life*. Milano: Springer Milan, 2014.

[21] C. D. Norman, & H. A. Skinner, "eHealth literacy: Essential skills for consumer health in a networked world," *J. Med. Internet Res.*, vol. 8, no. 2, pp. 1-11, 2006.

[22] M. Steinberg, & E. Rubin, *The HIPAA Privacy Rule: Lacks Patient Benefit, Impedes Research Growth*, Assoc. Acad. Heal. Centers, 2009.

[23] CENETEC-Salud, "Interoperabilidad Servicios Móviles y Uso de Telemonitoreo Basado en Biosensores," 2012.

PERIODICA: Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias

http://periodica.unam.mx/F?func=find-b-0&local_base=per01

Científica, vol. 21, núm. 1, pp. 35-41, enero-junio 2017.
eISSN en trámite, ISSN 1665-0654, ESIME Instituto Politécnico Nacional México

Análisis de envejecimiento de los pernos de cierre de la tapa de una vasija de un reactor nuclear tipo BWR*

Gilberto **Soto-Mendoza**[1]
Juan **Cruz-Castro**[1]
Alejandra **Armenta-Molina**[1]
Luis Héctor **Hernández-Gómez**[1]
Pablo **Ruiz-López**[2]
Noel **Moreno-Cuahquentzi**[3]
Alejandro **Luna-Áviles**[3]

[1]Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. Unidad Profesional Adolfo López Mateos
Col. Lindavista, CP 07738, Ciudad de México.
MÉXICO.
[2]Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias
Dr. José Ma. Barragán núm. 779, Colonia Narvarte. Del. Benito Juárez, CP 03020, Ciudad de México
MÉXICO.
[3]Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
Av. 16 de septiembre núm. 54, Col. Cabecera Municipal, CP 55700, Coacalco de Berriozábal, Estado de México.
MÉXICO.
correos electrónicos (emails): gilberto789456@hotmail.com
jcruzc.84@gmail.com, alejandra_armenta_m@esimez.mx
luishector56@hotmail.com, pruiz@cnsns.gob.mx
noelmoreno76@yahoo.com, alex_la2000@yahoo.com.mx

Recibido 26-04-2016, aceptado 18-10-2016.

Resumen

En el proceso de renovación de la licencia operativa de una central nuclear, se tiene que determinar que los diversos componentes que están relacionados con la seguridad que continúen operando sin ningún problema durante el período de extensión solicitado. En este trabajo, se presenta el análisis de envejecimiento de los pernos de cierre de la tapa de una vasija de un reactor nuclear tipo BWR. Para este efecto, la evaluación se compone de dos partes: (1) Un Programa de Gestión del Envejecimiento (AMP, por sus siglas en inglés) y (2) un Análisis de Envejecimiento de Tiempo Limitado (TLAA, por sus siglas en inglés). Se han tomado en cuenta los lineamientos establecidos en el NUREG 1800 Revisión 2 y el NUREG 1801 Revisión 2 [1], [2]. El primero contiene la estructura de una solicitud de la renovación de la licencia e información regulatoria, el segundo reúne experiencias que se han presentado en plantas nucleoeléctricas. También, se describe el AMP XI.M3 de los pernos e identifica el TLAA de fatiga que les corresponde. Los casos, que fueron considerados para determinar el daño acumulado de los pernos, son: precarga, prueba hidrostática, arranque, funcionamiento estable y apagado. Del documento IAEA-TECDOC-1470 [3] se recopila información como: presión de diseño, temperatura de operación, etc. El número de ciclos de las condiciones de operación fue obtenido de la solicitud de renovación de licencia de la central nuclear de Limerick [4]. Utilizando el método del elemento finito y siguiendo el procedimiento del código ASME Sección III, se obtiene el daño acumulado por fatiga (CUF) proyectado para 60 años [5] el cual es de 0.2458. Esto demuestra que se operará sin problemas y se satisfacen los criterios de aceptación la 10 CFR 54.21 (c) (1).

Palabras clave: factor de daño acumulado, fatiga, NUREG 1800, NUREG 1801.

Abstract (Aging Analysis of the Stud Bolts of the Closure Head of a BWR Nuclear Reactor Vessel)

Regarding the renewal of the operating license of a nuclear power plant, it has to be demonstrated that the components, which are related to safety, will continue in operation without any problems during the extension period requested. In this paper, an aging analysis of the reactor head closure stud bolting of a BWR reactor was carried on. For this purpose, it was considered the Aging Management Program, AMP XI.M3 and a Time Limited Aging Analysis (TLAA). They are based on the requirements established in the NUREG´s 1800 and 1801 [1], [2]. The first contains the structure of an application for renewal of an operating license and the regulatory outline, which has to be followed. The second document summarizes the experiences of similar nuclear power plants. The cases that were considered to determine the cumulative damage of the bolts, were: preloading, hydrostatic testing, startup, stable operation and shutdown. The operation parameters, such as design pressure, operating temperature, among others, were obtained from IAEA-TECDOC-1470 [3]. The number of cycles of operating conditions were obtained from the application of the renewal license of the Limerick nuclear power plant. [4]. The Cumulative Usage Factor (CUF) was obtained with the finite element method and the procedure of the ASME Code Section III [5]. This evaluation was considered for sixty years of operation. Under these conditions, the CUF was 0.2458. Therefore, the bolts will operate under safe conditions and the criteria of the 10 CFR 54.21 (c) (1) is satisfied.

Index terms: accumulative damage factor, fatigue, NUREG 1800, NUREG 1801.

*Este trabajo forma parte del proyecto denominado "Seguridad nuclear en la renovación de licencia de operación de la central nucleoeléctrica mexicana y generación de recursos humanos", proyecto del Fondo SENER Hidrocarburos CONACYT 211704.

1. Introducción

El creciente aumento en el consumo de energía eléctrica a nivel mundial y la contaminación derivada de la producción energética, han hecho que se busquen alternativas para satisfacer el suministro eléctrico. Una de estas opciones ha sido la energía nuclear. Esta no produce emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente que induce el efecto invernadero con el consiguiente calentamiento global o cambio climático. Para aprovechar al máximo este tipo de plantas, la tendencia a nivel mundial es incrementar su potencia y operarlas por un periodo adicional a su vida útil de diseño (40 años).

Consecuentemente, se busca la renovación de licencia operativa. Esta se autoriza con base en una evaluación de seguridad enfocada al envejecimiento de los componentes pasivos. A fin de poder emitir un juicio acerca de que los componentes pasivos cumplen o no con sus funciones de seguridad durante el período extendido de operación, es necesario llevar a cabo una serie de Programas de Gestión del Envejecimiento (AMP) y Análisis de Envejecimiento de Tiempo Limitado conocidos como TLAA (*Time Limited Aging Analysis*) [1], [2].

Los pernos de cierre de la vasija del reactor son componentes clasificados como clase 1, es decir, que si fallan su consecuencia es de alta severidad y son componentes que se encuentran en la frontera de presión. Su función principal es destapar el reactor para realizar las recargas de combustible y mantenerlo cerrado mientras opera. Los pernos forman parte de los componentes que requieren aparte de un AMP un estudio adicional (TLAA de fatiga). Este trabajo pretende demostrar para un caso tipo que los componentes evaluados cumplirán con sus funciones de seguridad durante el periodo extendido de operación. En este caso el TLAA es un análisis de fatiga donde se obtiene el daño acumulado por fatiga (CUF, por sus siglas en inglés) proyectado a 60 años. Para tal efecto y debido al control que existe sobre la energía nuclear es necesario conocer la normatividad del país de origen del reactor. El análisis implica el estudio de transferencia de calor, evaluación de fatiga y método del elemento finito.

2. Desarrollo

2.1. Descripción del problema

La vasija de un reactor BWR, es un recipiente de presión, cilíndrico vertical, con un fondo semiesférico soldado al cuerpo cilíndrico en la parte inferior. La parte superior tiene una tapa semiesférica desmontable que se utiliza para mantener cerrada la vasija durante la operación normal (sin permitir fugas). Durante las operaciones de recarga de combustible se requiere desmontar la tapa para permitir el mantenimiento de los internos, así como la recarga de los ensambles que contiene el combustible. El conjunto de cierre de la vasija del reactor está compuesto por: (1) pernos, (2) tuercas, (3) arandelas esféricas, (4) brida de la vasija y (5) brida de la tapa de la vasija (véase Fig. 1).

Con base en el NUREG 1801 Revisión 2 [2] los pernos de cierre de la vasija del reactor requieren un AMP y un TLAA de fatiga. Estos estudios son necesarios para demostrar que los componentes a evaluar cumplen o no con sus funciones de seguridad durante el periodo extendido de operación. En el TLAA se consideran los siguientes casos para determinar el daño acumulado de los pernos: precarga, prueba hidrostática, arranque, funcionamiento estable y apagado.

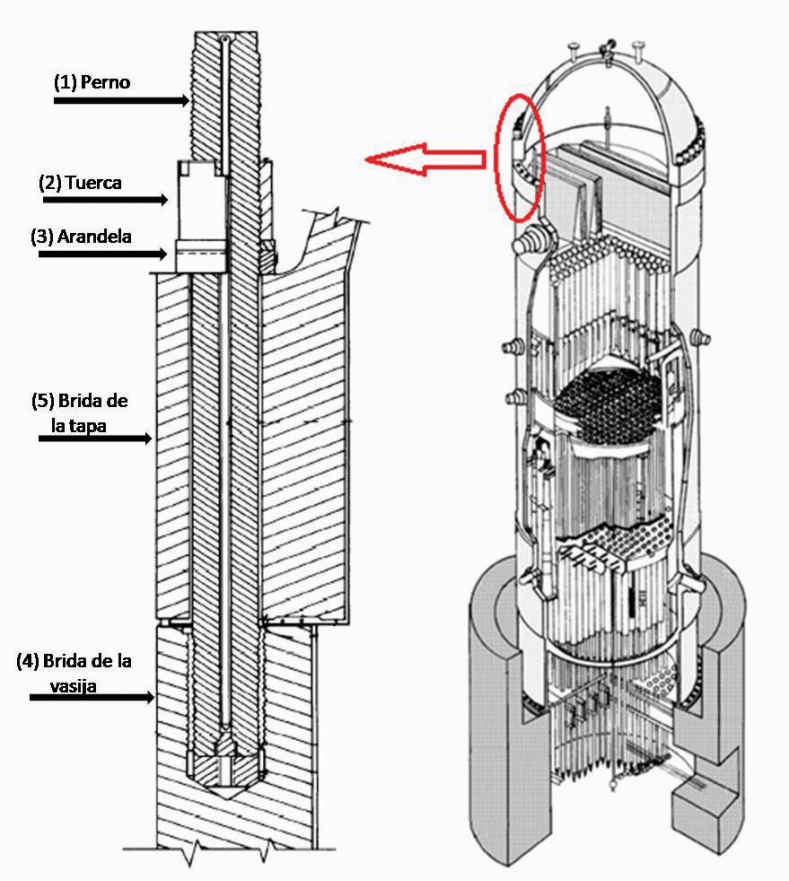


Fig. 1. Conjunto de cierre de la vasija.

2.2. Metodología

Para efectuar el análisis de los pernos de cierre de la vasija del reactor se siguen los siguientes pasos:

1. Identificar los componentes.
2. Revisar la normatividad aplicable.
3. Seguir los lineamientos establecidos en el NUREG 1800 Rev. 2 y el NUREG 1801 Rev. 2 [1], [2].
4. Recopilar información de los parámetros de diseño (presión, temperatura, ciclos de operación, etcétera).
5. Utilizar el método del elemento finito y seguir el procedimiento del código ASME Sección III, para obtener el daño acumulado por fatiga (CUF) de la brida y pernos de cierre de la vasija proyectados a 60 años.
6. Dar un veredicto en conformidad con los criterios de aceptación de la 10 CFR 54.21 (c) (1).

2.3. Identificación de los programas

El documento que sirve como punto de partida para relacionar los componentes con su respectivo AMP y su TLAA es el: "Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report: Reactor Vessel (BWR), NUREG-1801, Rev. 2". Este reporte técnico, en su capítulo IV Vasija del reactor, internos y sistema de enfriamiento, sección A1. Vasija del reactor (BWR) identifica en forma dichos programas. Con respecto a los pernos de cierre, la Tabla 1 señala los ítems correspondientes [2].

2.4. AMP XI.M3 Pernos de cierre de la tapa de la vasija del reactor

Descripción del programa de gestión del envejecimiento AMP

Este programa incluye: (a) inspección en servicio (ISI) de acuerdo con los requisitos del Código de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME), Sección XI, Subsección IWB (2004 edición, no adenda), Tabla IWB 2500-1[6]; y (b) aplicar medidas preventivas para mitigar el agrietamiento. El programa también se apoya en las recomendaciones para hacer frente a la degradación de los pernos de cierre de la tapa de la vasija del reactor tal como se expone en el NUREG-1339 [9] y la Comisión Nuclear Reguladora (NRC) Guía Reguladora (RG) 1.65. [10].

El programa contiene 10 elementos: (1) Alcance del programa; (2) Acciones preventivas; (3) Parámetros monitoreados / inspeccionados; (4) Detección de efectos del envejecimiento; (5) Monitoreo y tendencias; (6) Criterios de aceptación; (7) Acciones correctivas; (8) Confirmación del proceso; (9) Controles administrativos y; (10) Experiencia operativa.

2.5. Análisis de Envejecimiento de Tiempo Limitado (TLAA) de fatiga

Para la creación del modelo se emplearon como referencia las figuras del código ASME sección XI [6] y el manual de Dise-

Tabla 1. Identificación de los pernos de cierre [2].

Ítem	Efectos o mecanismo de envejecimiento	Programa de Gestión del envejecimiento (AMP)	Evaluación adicional
IV.A1.RP-51	Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo (SCC) y Agrietamiento intergranular por corrosión bajo esfuerzo (IGSCC)	AMP XI.M3 Pernos de cierre de la tapa de la vasija del reactor	No
IV.A1.RP-165	Pérdida de material debido a corrosión general, picaduras y corrosión en hendiduras o desgaste	AMP XI.M3 Pernos de cierre de la tapa de la vasija del reactor	No
IV.A1.RP-201	Daño acumulado por fatiga	La fatiga se evalúa en un TLAA para el período de extensión operación, y para componentes Clase 1 los efectos del medio ambiente sobre la fatiga deben considerados. (Vea la SRP, Sección 4.3 " Fatiga en Metales," métodos aceptables para cumplir los requerimientos de 10 CFR 54.21 (c) (1))	Sí, TLAA

Fig. 2. Modelo de la tapa, brida y pernos.

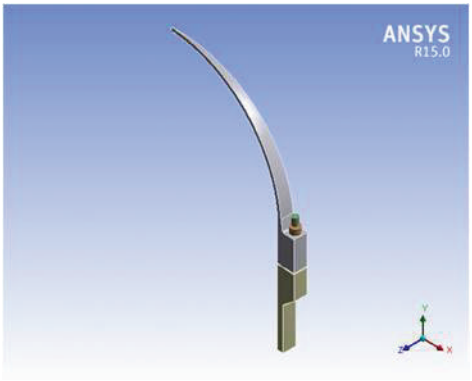


Fig. 3. Sección del modelo.

ño de recipientes a presión de Moss Denis [7]. Del documento IAEA-TECDOC-1470 [3] se recopila información como: presión de diseño, temperatura de operación, dimensiones generales, etc. (véase Tabla 2). Los diámetros de los pernos se calculan con en el código ASME, Sección III, Apéndice E, Artículo E-1000. Con base a esta información se construye el modelo de la tapa, brida y pernos (véase Fig. 2).

Con el fin de reducir los recursos computacionales requeridos, el modelo se simplifica a una sección de 1/60 (6°) del modelo completo (véase Fig. 3).

Las propiedades de los materiales se obtiene del código ASME Sección II [8]. Se genera la malla utilizando elementos sólidos 3D de alto orden como lo ilustra la Fig. 4.

Los casos a evaluar son:

- Precarga. En esta etapa los pernos de cierre de la tapa de la vasija son apretados con el fin de mantener cerrada herméticamente la tapa. Se considera una temperatura de 70°F.
- Prueba hidrostática. Es una prueba de presión en la que se somete a presión el reactor para verificar su hermeticidad. Se considera una temperatura de 70°F.
- Arranque. El reactor es puesto en marcha, la temperatura interna es incrementada hasta 575°F.
- Estado estable: Es la fase en la cual el reactor se mantiene operando.
- Paro. El reactor es detenido para realizar una recarga o detener el reactor ante algún evento. La temperatura interna del reactor baja. Se considera una temperatura de 90°F.

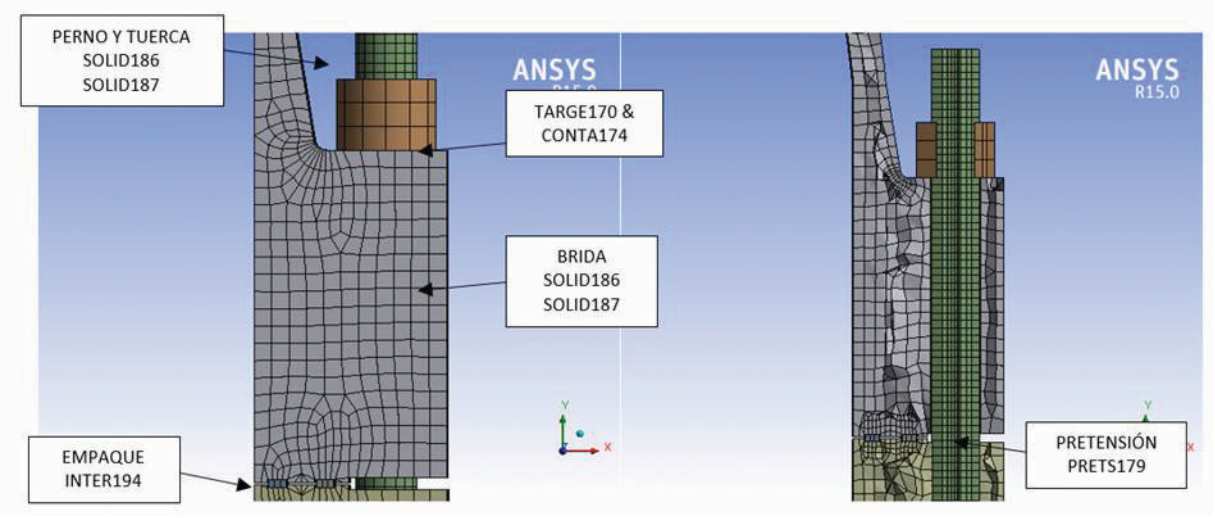


Fig. 4. Generación de malla del modelo.

Un criterio de diseño del código ASME es la Teoría de falla del esfuerzo cortante máximo que se encuentra estipulada en la Sección III, Reglas para la construcción de componentes de plantas nucleares, en el apartado NB-3212 [5]. Por dicha razón, los resultados de interés es la intensidad de esfuerzo (*stress intensity*) que corresponde a esta teoría. Los casos precarga y prueba hidrostática no requieren análisis térmico. Por otro lado el arranque, estado estable y paro si lo requieren. Las siguientes figuras ilustran los resultados del estado estable donde primero se hace un análisis térmico (véase Fig. 5 (A) y Fig. 5 (B)) sus resultados se importan a un análisis estructural para considerar los efectos térmicos (véase Fig. 5 (C)).

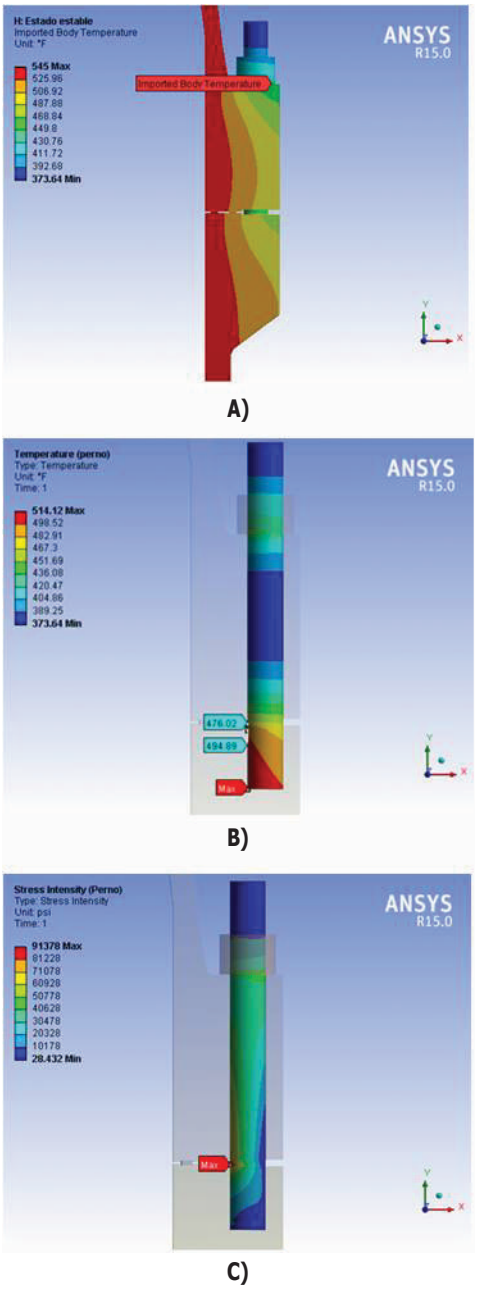


Fig. 5. Resultados del estado estable: A) Distribución de temperatura en modelo, B) Distribución de temperatura en el perno C) Intensidad de esfuerzo en el perno.

La Tabla 2 concentra los resultados de los casos de interés.

La forma de cuantificar el daño por fatiga es el factor de uso acumulado por fatiga (CUF) y se hace mediante la regla de Miner. Este valor nos indica cuanta vida se ha consumido. El procedimiento que se emplea se establece en el apartado NB-3222.4 del código ASME, Sección III. La amplitud de la intensidad de esfuerzo alternante (*Alternating Stress Intensity*) S_{alt} se determina con la siguiente fórmula [5]:

$$S_{alt} = \frac{1}{2} K_f (\sigma_{máx} - \sigma_{mín}) \frac{E_C}{E_T}$$

donde:
E_C: Módulo de elasticidad usado en la curva de fatiga (30×10^6 psi).
E_T: Módulo de elasticidad a la temperatura de trabajo.
K_f: Factor de concentración de esfuerzo por fatiga en la cuerda, NB-3232.3 (c) 4.

Se grafica la intendad de esfuerzos obtenidos para los casos de interes y se realiza el conteo de los ciclos con el método de Rain Flaw ya que nos permite hacer el conteo de ciclos cuando el esfuerzo medio varia. En forma general, consiste en ir recorriendo el historial de la carga localizando los picos y contando como un ciclo completo o como medio ciclo. Este método es similar a la caida de las gotas de lluvia cayendo por un tejado.

El factor de daño acumulado se realiza para cada uno de los casos analizados. Este se hace de manera similar. Como caso típico se ilustra el de la prueba hidrostática.

Tabla 2. Resumen de intensidad de esfuerzo máximo en pernos.

	Pernos	
Casos de interés	**Intensidad de esfuerzo máximo (psi/MPa)**	**Temperatura (°F)**
Precarga	72,720/501.3	70
Prueba hidrostática	96,350/664.3	70
Arranque	85,000/586.0	509
Estado estable	91,380/630.0	485
Paro	72,340/498.7	93

$n_1 = 55$ ciclos
$\sigma_{máx} = 96350$ psi
$\sigma_{mín} = 0$ psi
$E_{70°F} = 2.78 \times 10^6$ psi

$$S_{alt} = \frac{1}{2}(4)(96350 - 0)\frac{30.0}{27.8} = 207900 \text{ psi}$$

Se consulta la tabla I-9.1 y figura I-9.4 del código ASME Sección III [5] se tiene que: $S_i = 225$ ksi, $S_j = 143$ ksi, $N_i = 200$ ciclos y $N_j = 500$ ciclos.

$$N = N_i \left[\frac{N_j}{N_i}\right]^{\left[\frac{\log \frac{S_i}{S}}{\log \frac{S_i}{S_j}}\right]}$$

$$N = 200\left[\frac{500}{200}\right]^{\left[\frac{\log \frac{225.0}{207.9}}{\log \frac{225.0}{143.0}}\right]} = 234$$

Factor de uso acumulado por fatiga

$$U_1 = \frac{n_i}{N_i} = \frac{55}{234} = 0.235$$

La forma de cuantificar el daño por fatiga es el factor de uso acumulado por fatiga (CUF) y se hace mediante la regla de Miner:

$$CUF = \sum \frac{n_i}{N_i} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + ... = U_1 + U_2 + ... \leq 1$$

donde:
n = número de ciclos aplicados
N = número de ciclos permisibles

Factor de uso acumulado por fatiga total:

$$U = U_1 + U_2 + ... + U_n$$
$$CUF = U = 0.2458$$

3. Evaluación de resultados

Con base en el AMP XI.M3, los pernos de cierre de la tapa de la vasija del reactor se ven afectados por *agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo* (SCC) y *agrietamiento intergranular por corrosión bajo esfuerzo* (IGSCC) y *pérdida de material debido a corrosión o desgaste*. Como medidas para mitigar se tiene que:

- Evitar el uso de pernos con metal depositado (metal-plated).
- Utilizar un tratamiento superficial de fosfato de manganeso u otro que sea aceptable.
- Usar un lubricante estable. No se debe usar ningún lubricante que contenga disulfuro de molibdeno (MoS_2).
- El esfuerzo de cedencia del material debe ser menor a 150 ksi.

Implementando estas medidas de mitigación se puede reducir la posibilidad de que se presente el SCC, o IGSCC lo que hace a este programa más efectivo. El AMP XI.M3 es un programa existente en diversas plantas BWR y la inspección se lleva acabo conforme a los lineamientos del código ASME Sección XI.

Por otro lado el TLAA de fatiga está enfocado a la cuantificación del daño acumulado por fatiga. Este proceso se realiza conforme al código ASME Sección III. El cálculo del CUF para el caso de estudio se proyectó para 60 años obteniéndose el siguiente resultado:

$$CUF = 0.2458$$

Con lo anterior se verifica que los valores resultantes de CUF permanecen inferior o igual a uno durante el periodo extendido de operación. Por lo tanto cumple con 10 CFR 54.21 (c) (1) (ii) [1]. En una publicación previa de los coautores [11] se analizó el daño en un reactor BWR, sin embargo el daño acumulado requiere de diversos aspectos.

3. Conclusiones

Los pernos de cierre de la tapa de la vasija del reactor son componentes que requieren un AMP y un TLAA en el proceso de renovación de la licencia de operación. Los documentos base para el proceso de renovación de la licencia operativa son: El Plan de Revisión Estándar para la revisión de las Solicitudes de Renovación de licencia de las Centrales Nucleares (SRP-LR, NUREG 1800 Revisión 2) y el Reporte de Lecciones Genéricas Aprendidas del Envejecimiento (GALL, NUREG 1801 Revisión 2). Estos documentos proporcionan orientación, criterios y programas ya validados. El código ASME sección III es utilizado para el cálculo del Factor de Uso Acumulado por Fatiga (CUF). En el caso postulado el veredicto al que se llega es positivo ya que los resultados del CUF obtenido de los componentes evaluados son menores a uno, cumpliendo así con 10 CFR 54.21 (c) (1) (ii). Este resultado indica que los componentes cumplirán sus funciones para el periodo extendido de operación.

Agradecimientos

El apoyo para el desarrollo del Proyecto 211704 fue otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Este es agradecido (The grant for the development of the Project 211704 awarded by the National Council of Science and Technology (CONACYT) is kindly acknowledged).

Aclaración

Las opiniones y conclusiones vertidas en este artículo no representan la posición de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, donde el coautor P. Ruiz-López trabaja como empleado; o de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional. Aunque se ha puesto cuidado para mantener la exactitud de la información y resultados, ninguno de los autores asumen responsabilidad alguna por las consecuencias que puedan resultar de su uso. El uso de designaciones particulares de países, territorios, compañías, asociaciones, productos o metodologías no implican ningún juicio o promoción por parte de alguno de los autores.

Referencias

[1] USNRC, Standard Review Plan for Review of License Renewal Applications for Nuclear Power Plants, NUREG-1800, Rev. 2, 2010.

[2] USNRC, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report: Reactor Vessel (BWR), NUREG-1801, Rev. 2, 2010.

[3] International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1470, Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: BWR Pressure Vessel Internals, October 2005.

[4] License Renewal Application, Limerick Generating Station, Units 1 and 2, Facility Operating License Nos. NPF-39 and NPF-85.

[5] The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Section III, Rules for Construction of Nuclear Facility Components The ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2007 edition.

[6] The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Section XI, Reglas para inspección en servicio de componentes de plantas nucleares The ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2007 edition.

[7] Moss, D. R., & Basic, M., *Pressure Vessel Design Manual*, 4a ed., Great Britain: Elsevier, 2013.

[8] The American Society of Mechanical Engineers (ASME), Section II, *Materials The ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, 2007 edition.

[9] NUREG-1339, Resolution of Generic Safety Issue 29: Bolting Degradation or Failure in Nuclear Power Plants, June 1990.

[10] NRC Regulatory Guide 1.65, Material and Inspection for Reactor Vessel Closure Studs, Revision 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 2010.

[11] I. Sauceda-Meza, L. H. Hernández-Gómez, G. Urriolagoitia-Sosa, J. A. Beltrán-Fernández, E.M. Merchán-Cruz, J. M. Sandoval Pineda, & A. T. Velásquez Sánchez, "Thermal Fatigue Analysis of an Emergency Core Cooling System Nozzle of a BWR Reactor, by the Finite Element Method," *Científica*, vol. 11, núm. 3, pp. 113-119, 2007.

PERIÓDICA
Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias

periodica.unam.mx

Científica

indizada en

Latindex
Sistema Regional de Información en Línea
para Revistas Científicas de América Latina,
el Caribe, España y Portugal.
www.latindex.org

Periódica
Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias.
http://132.248.9.1:8991/F/-/?func=find-b-0&local_base=PER01

Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina
y el Caribe, España y Portugal.
Sistema de Información Científica Redalyc.
www.redalyc.org

Publindex
Índice Bibliográfico Nacional
Revistas Científicas Homologadas
del Colciencias.
http://scienti.colciencias.gov.co:8084/publindex/

Científica, vol. 21, núm. 1, pp. 43-48, enero-junio 2017.
eISSN en trámite, ISSN 1665-0654, ESIME Instituto Politécnico Nacional México

Do Intergalactic Photons Attract or Repel Each Other?

Héctor **Torres-Silva**[1]
Altair **Souza-de-Assis**[2]

[1]Universidad de Tarapacá
General Velázquez 1775, EIEE, Arica.
CHILE.
[2]Universidade Federal Fluminense-IM-GMA
Rua Miguel de Frias, 9, Icaraí Niterói-RJ.
BRASIL.

correos electrónicos (email):
htorres@uta.cl
altair@faperj.br

Recibido 17-05-2016, aceptado 20-09-2016.

Abstract

Through a simple model we study the possibility of photon with mass and charge that can produce an attractive or repulsive force at galactic distances. The main source of the dark mass can be provided by the non vanishing photon mass during the period of radiation of the Universe. A simple analysis shows that the non vanishing photon mass of the order of $m_\gamma \approx 10^{-34}$ eV is consistent with the current observations. This magnitude is less than the most stringent limit on the photon mass available so far, which is of the order of $m_\gamma \approx 10^{-27}$ eV. For distances separating nearby galaxies dominates the force of Newtonian attraction between photonic masses (Dark Matter). For distant galaxies dominates the repulsive electrical force between photon charges (Dark Energy). Also, we review the Red Shift Equation for a photon pair showing that this equation obtained with this simple model can be compared with the result obtained from the generalized special relativity. From the point of view of engineering this approach may be important to to correct distances and times in GPS signals from spacecraft very far from planet Earth.

Index terms: photon mass, gravitation, dark mass, dark energy, photon charge, GPS.

Resumen
(¿Los fotones intergalácticos se atraen o se repelen?)

A través de un modelo simple estudiamos la posibilidad de fotones con masa y carga que pueden producir una fuerza atractiva o repulsiva a distancias galácticas. La fuente principal de la masa oscura puede ser proporcionada por la masa del fotón durante el periodo de radiación del Universo. Un simple análisis muestra que la masa de fotones del orden de $m_\gamma \approx 10^{-34}$ eV es coherente con las observaciones actuales. Esta magnitud es menor que el límite más riguroso de la masa de fotones disponible hasta ahora, que es del orden de $m_\gamma \approx 10^{-27}$ eV. Para las distancias que separan las galaxias cercanas domina la fuerza de atracción newtoniana entre las masas fotónicas (materia oscura). Para galaxias distantes domina la fuerza eléctrica repulsiva entre las cargas de fotones (energía oscura). Además, se revisa la ecuación de desplazamiento del rojo para un par de fotones que muestra que esta ecuación obtenida con este modelo simple se puede comparar con el resultado obtenido de la relatividad especial generalizada. Desde el punto de vista ingenieril, este enfoque puede ser importante para corregir distancias y tiempos en señales de GPS de naves espaciales muy lejos del planeta Tierra.

Palabras clave: masa de fotón, gravitación, masa oscura, energía oscura, carga del fotón.

1. Introduction

The study of gravitational of interaction of Parallel-Propagating Photons has been considered in past by Tolman, Ehrenfest and Podolsky [1], as far as 1931, that first to publish studies on how light interacts with light gravitationally. After that Faraoni and Dumse [2] in 1999 and Jensen in 2013 [3] also addressed this same problem using different approaches. Heeck, [4], was able to derive the first direct bound on the photon lifetime from an analysis of the oldest light that exists in the universe, showing that the half-life of a photon is about 100 million times more than the age of universe. Kouwn *et al*. [5] investigate the cosmology of massive electrodynamics and explore the possibility whether the massive photon could provide an explanation of dark energy. The action is given by

the scalar-vector-tensor theory of gravity, which is obtained by nonminimal coupling of the massive Stueckelberg QED with gravity; its cosmological consequences are studied by paying particular attention to the role of photon mass, where the radiation -and matter- dominated epochs are followed by a long period of virtually constant dark energy that closely mimics a ΛCDM model. They also find that the main source of the current acceleration is provided by the nonvanishing photon mass governed by the relation $\Delta \approx m_\gamma^2$. A simple analysis shows that the non vanishing photon mass of the order of $m_\gamma \approx 10^{-34}$ eV is consistent with current observations. This magnitude is far less than the most stringent limit on the photon mass available so far, which is on the order of $\mu \approx 10^{-27}$ eV [6], [7], [8].

Indeed, it has later been realised that neutrino is the lightest particle in the Standard Model (SM) with a mass smaller by at least three orders of magnitude than the electron mass. The 2015 Nobel Prize in Physics was given to the discovery of neutrino oscillations that shows neutrinos are massive. Therefore the SM should have been modified in order to give a natural explanation to the question why neutrino masses are so small but non-zero. A similar modification that makes neutrinos massive may be valid for photon. As dictated by Okun, "such a small photon mass, albeit gauge non-invariant, does not destroy the renormalizability of Quantum Electrodynamics (QED) and its presence would not spoil the agreement between QED and experiment. This also motivates incessant searches for a non vanishing tiny photon mass" [6].

In this short letter, we propose a simple model to explain the possibility of massive photon. In next section Basic theory we give the basic theory and we discuss the photon mass and the charge related with dark matter and energy respectively. The following sections are related with Red Shift Equation due photon pair without theory of general relativity and Red Shift Equation from Generalized Special Relativity Theory, because from the point of view of engineering this approach may be important to correct distances and times in GPS signals from spacecraft very far from planet earth.

2. Basic Theory

We access here the problem of interaction between two particles, via any virtual carrier (graviton or photon), and address afresh the problem of photon inter interaction. Consider two particles with rest masses M and m, exchanging virtual hypothetical carriers of gravity (Gravitons. A spin 2 massless particle - in the framework of quantum field theory), shown in Fig. 1.

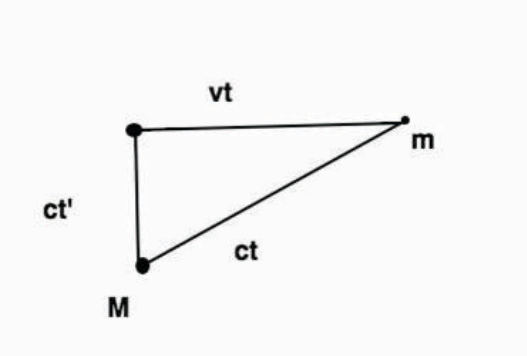


Fig. 1.

This reasoning would be also valid for electrical charges, but in this case the virtual elementary particles would be photons. The particle that emits the virtual photon loses momentum p in the recoil, and the other particle gets the momentum, but not at the time, as we will see, with the caveat of measuring all physical quantities from the reference frame placed at same position as M.

Consider that an inertial reference frame is at the particle M position and that particle m has a velocity v in relation to this frame. Therefore the information (on momentum for instance) triangle leads to the following equation,

$$c^2 t'^2 + v^2 t'^2 = c^2 t^2 \tag{1}$$

The variable t is the time in which the signal that leaves the particle M, at $t = 0$, reaches the original particle m position, that is, at $t = t$, measured at the reference frame at M. Since the particle m has a velocity v, with relation to the reference frame in M, when the information on the position of particle M reaches the original position of m, at $t = t$, the particle m will be at the position $d' = ct'$, where t' is the time when the information that left the particle M reaches the position where m is "now", after a time t has passed, that is, d', $d'^2 = d^2 - v^2t^2$. Based on that, we can construct the above triangle and so, we can write a relation between t and t', where $t - t'$ is the mismatch time between the two information arrivals or momentum exchange.

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - v^2 / t^2}} \tag{2}$$

Therefore, the gravitational force that m would feel due to M, if $v = 0$, is given by,

$$F^G_{mM}(d) = - GmM / d^2 \tag{3}$$

Of course the force that the particle M feels due to m is given by $F_{nM} = -GmM / d^2$, since it is at rest. Writing now the correct force (calculating the distance at the exact position where the particle m is now) that the mass m feels due to M, we have,

$$F^G_{mM}(d) = -GmM / d'^2 = -GmM \frac{1}{ct / \sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

$$= -F^G_{mM}(d)\,(1 - v^2 / c^2) \qquad (4a)$$

where $d' = d\sqrt{1 - v^2 / c^2}$

G is Newton's universal constant of gravitation and d' is the distance of the particle from the central massive photon. As

$$m = m_\gamma = m_0 \left(\sqrt{1 - v^2 / c^2}\right)^{-1}$$

then, $$F^G_{mM}(d') = -F^G_{m_0 M}(d)\sqrt{1 - v^2 / c^2} \qquad (4b)$$

Therefore, if $v = 0$, we get the usual $F^G_{mM} = F^G_{mM}$, with the caveat of considering the reference frame glued in M. Equation (4) is our main result.

If we consider photons, of course $v = c$ and the particle rest mass m ($m = 0$) will not feel any force from M ($M = 0$), and viceversa. This happen irrespective to the choice of positioning of the reference frame, since in any case $v = c$.

For photons, the information triangle is equilateral, and that is the reason why photons see each other as static, since the distance between them is $d = ct$. Each side of this information exchange equilateral triangle is d.

If we look the problem from the reference frame glued in m, we conclude that we get the same mismatch calculating the force, and then looking the space-time structure of the problem we have that Proca equations describe the behavior of a massive spin-1 field, and have since been used to set an impressive upper limit on the photon mass of $\mu < 2 \times 10^{-54}$ kg [4], or 10^{-18} eV in the natural units used in this Letter ($h = c = k_B = 1$). However in this case we adopt a lower limit for the mass of the photon in order to have a good match with the actual background radiation of the universe. It would be impossible to perform any experiment which establishes the exact vanishing of the photon mass, but the ultimate upper limit on the photon rest mass, m, can be estimated by using the uncertainty principle to be $m_\gamma \approx h/(\Delta t)c^2 = 10^{-34}$ eV for the current age of the Universe. This simple analysis verifies the deeper study of [5], [6], [7], which using the long-lived low-energy photons of the cosmic microwave background. J. Heeck [5] was able to derive the first direct bound on the photon lifetime from an analysis of the oldest light that exists in the universe.

Using the largest allowed value for the photon mass from other experiments, he finds a lower limit of about 3 yr on the photon rest-frame lifetime. After including the relativistic effects of time dilation, this implies that the half-life of a photon of visible light would rise, in the reference system of a resting observer, to about 10^8 years: 100 million times more than the age of universe. This excessive gap means that, for all intents and purposes, the photon lives forever. For photons in the visible spectrum, in all cases CMB spectral distribution for mass is $\mu < 10^{-7}$ eV has no visible effect.

The Heeck's analysis is completely independent of the possible particles in which a photon could disintegrate. It is based on the fact that, if a fraction of the photons in the microwave background had disintegrated, the spectrum of that radiation would not coincide with that of a blackbody. Since the spectrum of the microwave background has been measured with great precision, it possible deviation is strongly constrained by observations.

On the other hand, if photons have mass, the Yukawa force law between two electric charges q_γ and Q_γ separated by a distance d' is

$$F^E_{mM} = k\, q_\gamma\, Q_\gamma / (d'^2) e^{-\mu d'} (1 + \mu d') \qquad (5)$$

where $\mu = m_\gamma c / h$ includes the photon mass m_γ, the speed of light c, and Planck's constant h. This equation corresponds exactly to the ordinary Coulomb force law $F^E_{mM} = k\, q_\gamma\, Q_\gamma / d'^2$ when the photon mass is zero. However, even for small photon mass, these equations will nearly be the same, since a small factor of μ in the Yukawa force law will hardly make any difference experimentally. On the other hand, a large mass will impose a sharp cutoff in the strength of the force, since the exponentially decaying term in the equation will throttle it. That's how the Yukawa force (with the appropriate changes to represent nuclear forces instead of electromagnetic) predicts the short range of the nuclear force and the value of the pion mass. However for cosmological distances the photon mass may be important as a positive gravitational force separating the galaxies (see equation (4a)).

If $v/c < 1$, but v very close to c we have an attractive force between nearby galaxies given by equation (4b), which can represent the dark matter. If $v/c \geq 1$, we have a repulsive force produced by the dark energy. The main source of the dark energy is provided by the nonvanishing photon mass during the period of radiation of the Universe. If the size of Universe is about $R = 10^{26}$ m, then in electronvolts corresponds to 10^{-34} eV, so this simple analysis shows that the non vanishing photon mass of the order of $m_\gamma \approx 10^{-34}$ eV is consistent with the current observations. This magnitude is far less than the most stringent

limit on the photon mass available so far, which is of $m_\gamma \approx 10^{-27}$ eV the order of [8], [9], [11], [12]. In other words, if the photon's mass is 10 million times smaller than that limit, the way that photons interact with the different fields and forces in the Universe leads to a repulsive effect that looks to calling dark energy. In other words, massive photons could cause dark energy.

Here we need to obtain an upper limit on the photon electric charge from the cosmic microwave background. Following [13] and [14], we consider the cosmic microwave background radiation like a black body temperature $T_B = 2.74$ K and the photon number density given by $n_\gamma \approx \beta\,(K_B T_B/hc)^3$ where K_B is the Boltzmann constant, β is a numerical coefficient of order unity. If each photon has a charge q_γ, then the electric force density is proportional to $(n_\gamma q_\gamma)^2$ with the condition of

$$(n_\gamma q_\gamma)^2 = G\rho^2 \tag{6}$$

where ρ is the average mass density of the Universe. From here we can obtain that $q_\gamma < 10^{-27} e$ in esu units, where e is the electron charge. Then the repulsive force

$$F^E_{mM} = k\, q_\gamma\, Q_\gamma / (d'^2) \tag{7}$$

would be responsible for the dark energy that separates increasingly distant galaxies. Here we consider the situation where the electric field is parallel to the magnetic field and the vector Poyntig is zero [15]. In short, for distances separating nearby galaxies dominates the force of Newtonian attraction between photonic masses (Dark Matter). For distant galaxies dominates the repulsive electrical force between photon charges (Dark Energy).

From the point of view of engineering this approach may be important to to correct distances and times in GPS signals from spacecraft very far from planet earth. The two last sections are related with this topic.

3. Red Shift Equation due photon pair without theory of general relativity

Conservation of energy yields the fact that the sum of the kinetic and potential energies is a constant. If a photon of mass m is moving under the influence of a gravitational field generated by a massive central body of mass M (massive photon), Newton's law of gravitation shows that the potential energy is given by GMm/d', where G is Newton's universal constant of gravitation and r is the distance of the particle from the central massive body.

If the mass-energy relation $E = mc^2 = h\nu$, which relates the kinetic energy to the product of mass and the square of the speed of light, is introduced, then an 'effective mass' for the photon may be deduced and is given by $m = h\nu/c^2$. The equation expressing conservation of energy then becomes

$$h\nu - GMm / d' = h\nu - GMh\nu / d'c^2 = \text{constant}$$

This equation immediately allows the well established expression for the gravitational red-shift to be deduced. From equation (4, or 4'), we have $F^G_{nM} = -\nabla E$, so for a photon with mass, the equation of conservation of energy becomes

$$h\nu - GMh\nu / d'\,c^2 = h\nu_{r=\infty}$$

$$(\nu_{r=\infty} - \nu) / \nu = -GM / d'c^2 \tag{8}$$

which is the desired result obtained from the Einstein Theory [9], [10]. In the above derivation of the expression for the gravitational red-shift, no appeal has been made to any aspect of the theory of general relativity, not even the principle of equivalence It seems surprising that the above deduction of an 'effective mass' for the photon allows this simple derivation of the red-shift formula. Although two photons with mass would produce a very small value of red-shift, to compare with equation (8), it is important to obtain the Gravitational Red-Shift using the Generalized Special Relativity theory, (GSR).

4. Derivation of the Red Shift Equation from Generalized Special Relativity Theory

In all basic studies involved in the theory of general relativity, attention was drawn to the three main problems related to it, those are well-known advance of the perihelion of the planet Mercury, the Gravitational Deflection of Light Rays and the Gravitational Red-Shift of Spectral Lines. The gravitational red-shift discussed within the emitted rays from a particle that located in the field of another rest particle due to a spherical symmetry (such as Solar field), the atoms that compose the gases edges of a rest star forms light sources in the star field, and according to this information the Gravitational Red-Shift obtained [3]. This study introduces a new method to obtain the same result of the Gravitational Red-Shift using the Generalized Special Relativity theory, (GSR) by adopting the approximation of the gravitational potential.

The Generalized Special Relativity Theory is a new form of the special relativity theory that adopts the gravitational potential, and it gives the formula of relative mass to be as follows [4]: with our approach the photon mass is

$$m = g_{00}\, m_0 / \sqrt{g_{gg} - v^2 / c^2} \tag{9}$$

where, $g_{00} = 1 + 2\varphi / c^2$ φ and denotes the gravitational potential, or the field in which the mass is measured. here, we generalize γ to include the effect of gravitation by adopting the weak field approximation where [6]:

$$g_{11} = -1,\ g_{00} = 1 + 2\varphi / c^2 \tag{10}$$

and can be generalized to recognize the effect of motion as well as gravity on time, to get:

$$dt = dt_0 / \sqrt{g_{gg} - v^2 / c^2} \tag{11}$$

Einstein's mass and energy equivalent relation, agrees that the energy of a particle is given by [7]:

$$E = mc^2 = hv \tag{12}$$

where h is Planck's constant and c is the speed of light, substitute the mass m from this one gets:

$$E = mc^2 = m_0 c^2 (1 + \varphi / c^2) \tag{13}$$

The difference in particles or light energy presented as [7], [8], [9].

$$\Delta E = mc^2 - m_0 c^2 = m_0 c^2 (1 + \varphi / c^2) - m_0 c^2 = m_0 \varphi \tag{14}$$

Then $\Delta E / E_0 = \Delta hv / hv_0 = MG / dc^2$. As mentioned before, φ denotes the potential field, which can be given by $\varphi = -Mg/r$ so

$$\Delta E / E_0 = \Delta hv / hv_0 = MG / dc^2 \tag{15}$$

which is equation (8).

So adopting of the weak field approximation in the generalized special relativity, leads to succeed in proving an important theory in physics such as the gravitational red-shift of the spectral lines, and on the other hand, it explains that the appearance of the weak field does not affect the red shift negatively, but, oppositely the generalized special relativity succeeded again.

From the point of view of engineering this approach may be important to to correct distances and times in GPS signals from spacecraft very far from planet earth.

If we have a rocket the principle of equivalence, leads to the prediction of a gravitational frequency shift. A rocket with acceleration g upwards contains a transmitter and a receiver at height L above the transmitter. We view this accelerating rocket from a reference frame which is inertial. At the instant the rocket starts up, the signal is transmitted. The time required to reach the receiver is essentially. But during the propagation of the signal to the receiver, the receiver picks up a velocity

$$v = gt = gL / c \tag{16}$$

Then when the signal is detected the frequency must be the same as that detected by a receiver moving at constant velocity, at the location of the receiver, but not accelerating. To this receiver, the transmitter is a receding source and the frequency will be Doppler shifted downwards:

$$\Delta hv / hv_0 = -v/c = -gL / c^2 \tag{17}$$

By the principle of equivalence, the physics in the accelerating rocket is the same as it would be in a gravitational field of strength. Thus the accelerated observer would attribute the frequency change to the gravitational field, and then the product gL may be identified in terms of the change in gravitational potential, $\Delta\Phi = gL$

$$\Delta v / v_0 = -\Delta\Phi / c^2 \tag{18}$$

As the rocket continues to accelerate with constant velocity, (as long as the velocity does not get too large), the frequency shift will remain constant so that to the observer in the rocket, the frequency of the clock that is driving the transmitter, and that in this case is lower down in the gravitational field, is beating more slowly. So comparing two clocks at different potentials, they should beat at different rates. The rate difference between a clock at potential $\Phi + \Delta\Phi$ and one at Φ can be computed in terms of a fractional frequency shift by reversing the sign in Eq. (18) which is equation (8).

Gravitational frequency shifts in the GPS is as follow. Consider then two clocks, a reference clock at rest on the earth's equator at radius R_E, and an atomic clock in orbit at radius d'. The gravitational potential of the clock in orbit is, to sufficient accuracy

$$\Phi = GM_E / d',\ d' = \sqrt{d^2 - v^2 t^2}$$

where for earth,

$$GM_E = 3.98604415 \times 10^{14}\ m^3/s^2$$

The total gravitational frequency shift of GPS satellite clocks is therefore

$$\Delta v / v_0 = -GM_E / 'd'c^2 + GM_E / R_E c^2 = 5288 \times 10^{-14}$$

This is actually a huge effect. If not accounted for, in one day it could build up to a timing error that would translate into a navigational error of 13.7 km. Good GPS satellite clocks have intrinsic stabilities that allow them to keep time to within a few parts in 10^{14} after a day. The gravitational frequency shift is thousands of times bigger than this because the distance d' must be corrected according equation $d' = d\sqrt{1 - v^2 / c^2}$.

5. Conclusion

Through a simple model we study the possibility of photon with mass that can produce an attractive or repulsive force at galactic distances. The main source of the dark energy can be provided by the non vanishing photon mass during the period of radiation without Poynting vector of the Universe. A simple analysis shows that the non vanishing photon mass of the order of $m_\gamma \approx 10^{-34}$ eV is consistent with the current observations. It would be certainly impossible to perform any experiment which establishes the exact vanishing of the photon mass, but the ultimate upper limit on the photon rest mass m, can be estimated by using the uncertainty principle to be $m_\gamma \approx h / (\Delta t)c^2 = 10^{-34}$ eV for the current age of the Universe. This magnitude is far less than the most stringent limit on the photon mass available so far, which is of the order of $m_\gamma \approx 10^{-27}$ eV. From the electric point of view, the repulsive force $F_{nM} = kq_\gamma Q_\gamma / d'^2$ would be responsible for the dark energy that separates increasingly distant galaxies, that is, for distances separating nearby galaxies dominates the force of Newtonian attraction between photonic masses (Dark Matter). For distant galaxies dominates the repulsive electrical force between photon charges (Dark Energy).

With this theory, we review the Red Shift Equation for a photon pair showing that equation (8) is obtained with this simple model and compared with the result obtained the generalized special relativity. Also, we review the Red Shift Equation from Generalized Special Relativity Theory, equation (15). From the point of view of engineering this approach may be important to to correct distances and times in GPS signals from spacecraft very far from planet earth.

References

[1] R. C. Tolman, P. Ehrenfest, & B. Podolsky, "On the gravitational field produced by light," *Physical Review*, vol. 37, pp. 602-615, 1931.

[2] V. Faraoni, & R. M. Dumse, "The gravitational interaction of light: from weak to strong fields," *General Relativity and Gravitation*, vol. 31, no. 1, pp. 91-105, 1999.

[3] R. Jensen, "Simple Explanation for why Parallel-Propagating Photons do not Gravitationally Attract," *Progress in Physics*, vol. 4, Oct. 2013.

[4] J. Heeck, "How Stable is the Photon?," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 111, pp. 021801/1-021801/4, July 2013.

[5] S. Kouwn, P. Oh, & C. G. Park, "Massive photon and dark energy," *Phys. Rev. D,* vol. 93, 083012, 2016.

[6] L. B. Okun, "Photon: History, mass, charge," *Acta Phys. Polon. B,* vol. 37, pp. 565-574, 2006.

[7] A. S. Goldhaber, & M. M. Nieto, "Photon and graviton mass limits," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 82, 939, March 2010.

[8] L. C. Tu, J. Luo, & G. T. Gillies, "The mass of the photon," *Rep. Prog. Phys.*, vol. 68, pp. 77-130, Nov. 2004.

[9] R. F. Evans, & J. Dunning-Davies, *The Gravitational Red-Shift*, University of Hull, England, 2004.

[10] R. Adler, M. Bazin, & M. Schiffer, *Introduction to General Relativity*, McGraw-Hill, New York, 1965.

[11] K. Hagiwara *et al*. "Review of particle physics. Particle Data Group," *Phys. Rev. D*, vol. 66, 2002.

[12] E. J. Kima, S. Kouwna, P. Oha, & C. G. Parkd, "Dark aspects of massive spinor electrodynamics," *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2014, pp. 1-17 July 2014.

[13] C. Sivaram, "Upper limits on the photon electric charge from the cosmic microwave background," *American Journal of Physics* vol. 63, no. 5, pp. 473-473, 1995.

[14] G. Cocconi, "Upper limit on the electric charge of the photon," *American Journal of Physics*, vol. 60, pp. 750-751, 1992.

[15] H. Torres-Silva, & J. López-Bonilla, "Chiral transverse electromagnetic waves with E ll B in a cold plasma," *Prespacetime Journal*, vol. 7, no. 10, pp. 1365-1368, 2016.

SISTEMA DE INFORMACIÓN CIENTÍFICA REDALYC

www.redalyc.org

Científica, vol. 21, núm. 1, pp. 49-54, enero-junio 2017.
eISSN en trámite, ISSN 1665-0654, ESIME Instituto Politécnico Nacional México

Construction of a Homogeneous Magnetic Field for Orthopedic Applications

Pedro A. **Lomelí-Mejía**[1]
Alfredo **Tejeda-Buenosaires**[2]
José **Alanís-Carbajal**[1]

[1]Instituto Nacional de Rehabilitación (México)
National Institute of Rehabilitation (Mexico)
Av. México-Xochimilco 289, CP 14389, Mexico City.
MEXICO.
[2]TRANSFORM-MEX
República del Salvador No 30-201, Col. Centro, CP 06000,
Mexico City.
MEXICO.

emails:
plomeli@inr.gob.mx
palm7@hotmail.com

Recibido 02-05-2016, aceptado 29-11-2016.

Abstract

The application of magnetic fields is diverse in the many branches of health care, due to its systemic effect. Particularly in orthopedics, magnetic fields can be applied in order to achieve bone consolidation. However, getting a uniform magnetic field in a useful area, and which is also stable is not an easy task. In order to obtain a magnetic field with these characteristics, an arrangement of Helmholtz coils was designed. In this work, the theoretical development of the device is presented; as well, the software VIZIMAG is used in order to know the distribution of the field lines graphically. Another important information provided in this article is the technical details of the building of the device, which permits not only the selection of the most adequate kind of wire, but also provides an excellent guide for the manufacture of Helmholtz coils, which is difficult to do starting only with the theoretical data obtained from a book about electromagnetism

Index terms: magnetic fields, software design, orthopedic use.

Resumen
(Construcción de un campo magnético homogéneo para aplicaciones ortopédicas)

La aplicación de campos magnéticos es diversa, en muchos campos del cuidado de la salud, debido a su efecto sistémico. En particular en ortopedia, es posible lograr la estimulación de la consolidación ósea. Pero lograr un campo magnético uniforme en una área útil y, además, estable no es fácil. Para obtener el campo magnético se diseñó un arreglo de bobinas Helmholtz. Se presenta el desarrollo teórico de las mismas y, además, se dispone del programa VIZIMAG para conocer la distribución de las líneas de campo, de forma gráfica. Otra información importante que se proporciona en este trabajo, son los detalles técnicos de construcción, lo cual permite no solo seleccionar el alambre adecuado, también proporcionan una excelente guía para la construcción de las bobinas Helmholtz, lo cual es difícil hacer partiendo solamente de los datos teóricos obtenidos en un libro de electromagnetismo.

Palabras clave: campos magnéticos, programa de diseño, uso ortopédico.

1. Introduction

Bone consolidation is, undoubtedly, a very important problem in the field of orthopedics, mainly if elderly people with expose fractures or with any kind of pathology as infections or microvascularity problems are taken into account [1], [2], [3], [4], [5], just to quote some. Nowadays, in order to treat these cases, other therapies [6], [7] exist, but unfortunately, very few are non-invasive and low-cost, so that any person who need them can have access to them.

With therapeutic electromagnetic radiation [8], [9], [10], [11], (frequencies 100 Hz, and intensity in the order of 5 mT) there is a systemic effect [12], [13]: electric fields of the order of 1-1.5 mV/cm [14] are induced, which orient the bipolar molecular moments and give origin to ion alternate movements in the cellular membrane, mainly of calcium, sodium, chloride and potassium. It is also known that there is an interaction in the

hormonal activity, in growth factor, cytokines, and an increase of RNA. As well, cellular differentiation and stimulation of organic structures are fostered, and among them, bone consolidation. This is achieved besides allowing a relaxation in blood vessels, an increase in the content of blood oxygen, alkalization of body fluids, a decrease in blood cholesterol, a reduction of edema, increase in endorphins, muscle relaxation, among many other well-known effects [15], [16], [17], [18].

2. Development

In order to obtain the magnetic field, a Helmholtz system was built, whose main characteristic is the capacity to obtain homogeneous magnetic fields along its axis. The system is formed by two identical coils located at a distance among them, equal in their radius r and connected in series, as shown in figure 1.

The magnetic field between the coils is determined by the following equation [19], [20]:

$$B(z)=\frac{\mu_0 inr^2}{2}\left[\frac{1}{(r^2/z_1^2)^{3/2}}+\frac{1}{(r^2/z_2^2)^{3/2}}\right] \quad (1)$$

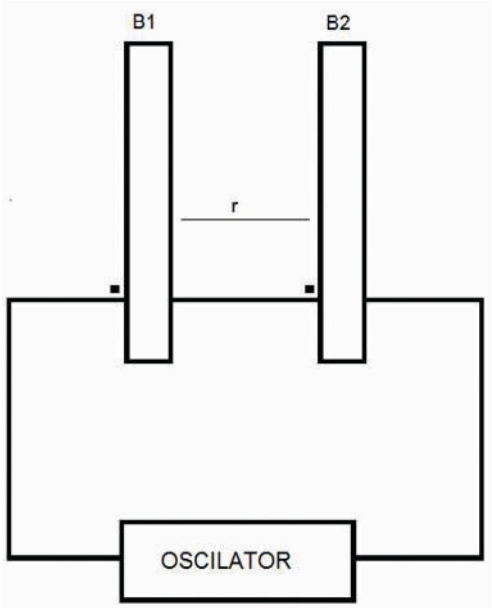


Fig. 1. Disposition of coils in order to form a Helmholtz arrangement.

Particularly when considering a point in the center of the axis of the Helmholtz coils, equation (1) is transformed into (2)

$$B(z)=\frac{\mu_0 inr^2}{2}\left[\frac{1}{\left[r^2+\left[\frac{r}{2}-z\right]^2\right]^{3/2}}+\frac{1}{\left[r^2+\left[\frac{r}{2}+z\right]^2\right]^{3/2}}\right] \quad (2)$$

From (2), for a discrete sequence of points along axis *z*, it is obtained the distribution of the field shown in figure 2.

As it is expected that the system can be applied easily, it was decided to make the coils adjusting the theoretical needs to the dimensions of modified spools, provided by the Company TRANSFORM-MEX, see figure 3. The radius of each coil is 7.5 cm, and the available coiling area is approximately 9.66 cm^2, from which 6.5 cm^2 were used. The maximum number of turns was calculated taking into account the calibers of AWG commercial copper wires, as shown in table 1.

Caliber 17 AWG was decided to be used, because when using this wire, an acceptable tolerance of 1.5 A with respect to the one needed is produced (caliber 17 AWG bares 3.1 A maximum, at 700 circular mil by A. The American Wire Gauge defined "circular mil" with the internal area of a circle with a thousandth of an inch diameter, in order to simplify the calculations, as introducing Π is not necessary), so that coils can be used for long periods of more than 4 hours continuously, without the possibility of heating [21].

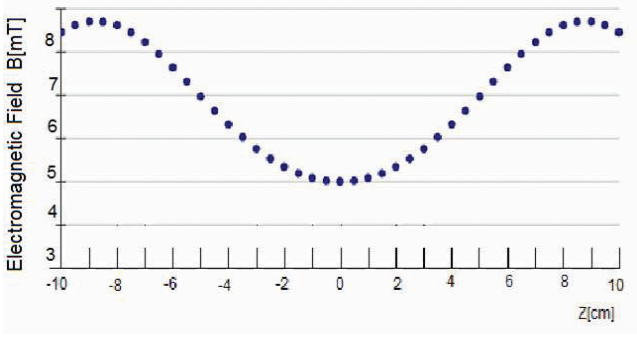


Fig. 2. Distribution of magnetic field according to (2).

Table 1. Calculations to select the most suitable wire.

AWG	Área [cm²]	Turns	Length [m]	Resistance [Ω]	I maximum [A]	I needed [A]	I allowed [A]
14	0.02082	312	166.7688	11.80027	22.21890	3.65440	5.9
16	0.01309	497	265.1990	4.64788	8.60607	2.29800	3.7
17	0.10380	626	334.4373	7.53905	5.30571	1.67200	3.1
18	0.00824	789	421.5238	11.6167	3.44330	1.62050	2.3
20	0.00519	1252	668.7201	28.02606	1.42724	0.91131	1.5

The total length of magnet wire is $l = 630\,\pi\phi = 336.47$. The total resistance of the conductor was calculated is: $R = \rho(l/A) = 5.4393\ \Omega$ and the measure was 6.35 Ω per coil, where $\rho = 16.78\ \text{x}10^{-9}\ \Omega\ \text{m}^{-1}$ is the resistivity of copper and A is the transversal section of the wire. The current which was applied is 2.2 A and the voltage applied was obtained by means of the Ohm law and was 30 volts.

When using the software VISIMAG, version 3.1, with the calculated data, the field lines distribution is obtained for the proposed Helmholtz coil. A high density of magnetic field lines (a) is clearly observed in the central part of the coils, even when a dielectric is located, as it can be a human bone (b), as shown in figure 4.

In figure 5, the distribution of energy of the magnetic field is presented with respect to its axis.

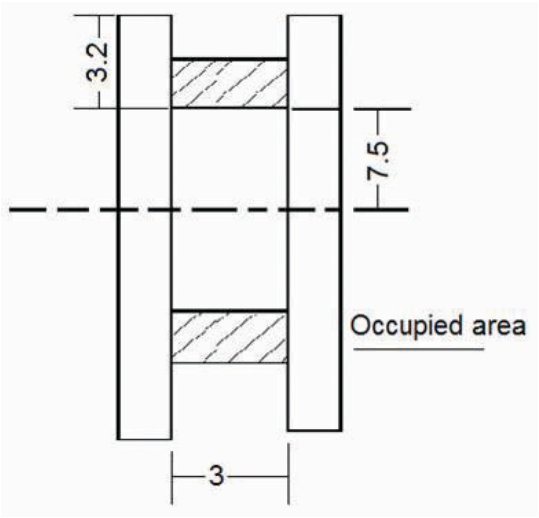


Fig. 3. Modified spool, dimensions are in cm.

In table 2, the values of the magnetic fields calculated theoretically and obtained with the software VIZIMAG, are shown for various point along axis z.

Table 2. Experimental, average, simulated and theoretical measurements of magnetic field.

Z [cm]	B_1 [mT]	B_2 [mT]	$\overline{B}$ [mT]	B simulated [mT]	B theoretical [mT]
−5	6.12	6.29	6.205	5.74	6.9330
−4	5.52	6.52	6.020	5.52	6.3143
−3	5.37	6.00	5.685	5.33	5.7592
−2	5.14	5.63	5.385	5.16	5.3423
−1	5.02	5.20	5.110	5.04	5.0861
0	5.00	5.00	5.000	5.00	5.0000
1	5.02	5.12	5.070	5.04	5.0861
2	5.19	5.27	5.230	5.16	5.3423
3	5.61	5.44	5.525	5.33	5.7592
4	5.96	5.85	5.905	5.52	6.3143
5	6.48	6.06	6.270	5.74	6.9633

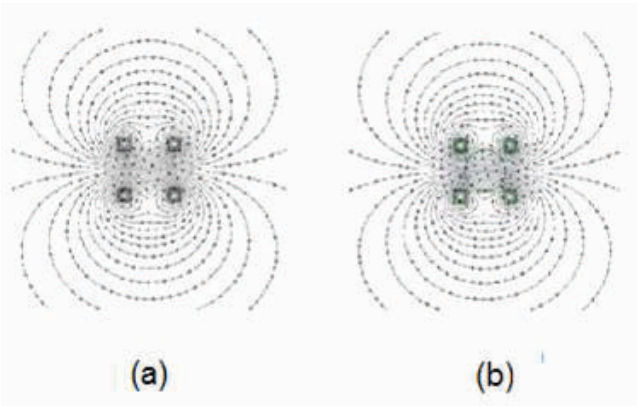


Fig. 4. Modified spool, dimensions are in cm.

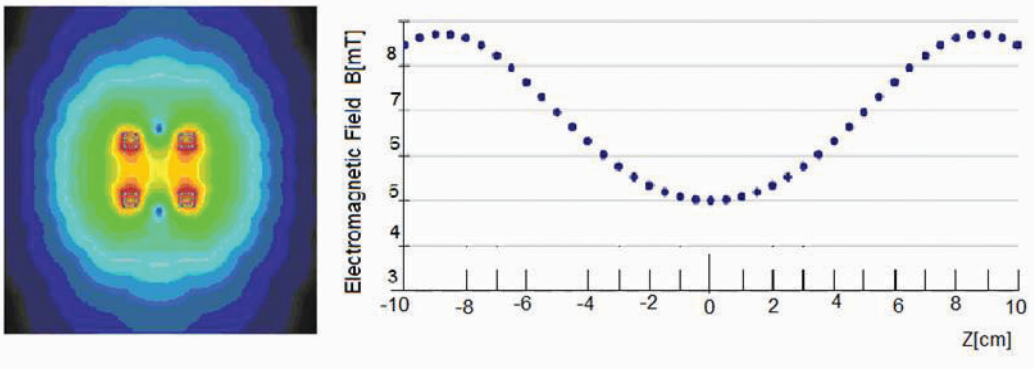


Fig. 5. (a) Distribution of energy of the magnetic field, and (b) with respect to its axis z.

In order to measure the magnitude of the magnetic field, a Gaussmeter Magnet-PhysiK FH54Gauss -/Testameter with a Hall point of 20 cm was used; B_1 is the first measurement, performed in left-right direction between the coils, and B_2 contrariwise in the same conditions. In table 2, the measurements of field in both directions are shown.

In figure 6, a comparison of the magnetic field (a) obtained theoretically, and by means of simulation with software VIZIMAG, and an average of both is presented. A graph of relative errors between the field measured in several points and the one obtained by means of simulation is also shown.

As it can be seen in figure 6, there is a difference between the field measured, the simulated and the theoretical. In table 3, the errors made with respect to the theoretical data by means of the percentage relative error are shown.

Table 3. Measured and simulated relative errors.

Z [cm]	Measured error [%]	Simulated error [%]
−5	12.25	21.31
−4	4.88	14.39
−3	1.28	8.05
−2	0.76	3.53
−1	0.52	0.91
0	0.00	0.40
1	0.27	0.91
2	2.19	3.53
3	4.26	8.05
4	6.97	14.39
5	11.09	21.31

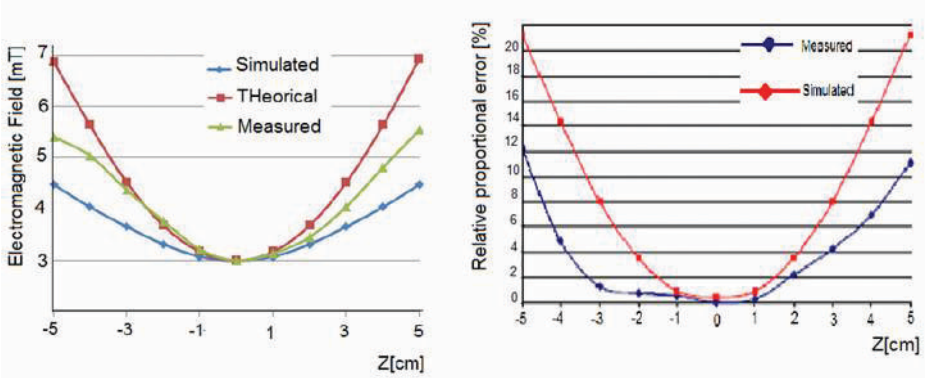


Fig. 6. Magnetic field obtained theoretically (a), and by means of simulation with software VIZIMAG, and an average of both, (b) graph of relative errors between the field measured in several points and the one obtained by means of simulation.

3. Discussion and conclusions

When using the software VIZIMAG, it was possible to know graphically the response of the Helmholtz system before starting its construction, varying the parameters that are considered of practical interest, as the distance between the coils or a dielectric located in their axis, where a higher density of field lines appeared. From these findings, it was possible to compare the theoretical results with the ones obtained by means of the software, and with the experimental measures. This way, it is possible to know the magnitude of the error in the design, and the way to optimize it, so that both the time of construction and expenses can be reduced.

In this work, the energy source is not mentioned in detail, but a source with pulsed voltage can work as well as with continuous voltage, as in the case presented here.

It is important to mention that by counting with the advice of a company dedicated to the manufacture of coils and electric transformers it was possible to take into account the necessary information for the optimal selection of wire, as well as for the construction of the coils [22], [23].

References

[1] K. H. Lin Hy, "Reparing large bone fractures with low frequency electromagnetic fields," *J Orthop Res*, vol. 28, no. 2, pp. 265-270, 2010.

[2] M. E. Moncada, & H. Cadavid, "Estimación de variables eléctricas en un muslo 3D con fractura diálisis femoral estimulado magnéticamente," *Rev. Fac. Ing. Univ Antioquía*, no.42, pp.120-131, 2007.

[3] H. Matsumoto, M. Ochi, Y. Abiko,T. Kaku, & K. Sakaguchi, "Pulsed electromagnetic fields promote bone formation around dental implants inserted into of rabbits," *Clin Oral Impl Res*, no. 11, pp. 354-360, 2000.

[4] V. Cané, P. Botti, & S. Soana, "Pulsed magnetic fields improve osteoblast activity during the repair of an experimental osseous defect," *J Orthopaedic Research*, vol. 11, no. 5, pp. 664-670, 1993.

[5] R. A. Luben, C. D. Cain, M. C. Chen, D. M. Rosen, & W. R. Adey, "Effects of electromagnetic stimuli on bone and bone cells in vitro: inhibition of responses to parathyroid hormone by low-energy low frequency fields," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 79, no. 13, pp. 4180-4184, 1982.

[6] I. Garavello, V. Baranauskas, & M.A. da Cruz-Höfling, "The effects of low laser irradiation on angiogenesis in injured rat tibiae," *Histol Histopathol*, no.19, pp. 43-48, 2004.

[7] C. Goldstein, S. Sprague, & B. A. Petrisor, "Electrical stimulation for fracture healing: Current evidence," Orthop Trauma, vol. 24, no. 3, pp. S62-S65, 2010.

[8] S. A. W. Pickering, & B.E. Scammell, "Electromagnetic fields for bone healing," *Lower Extremity Wounds*, vol. 1, no. 3, pp.152-160, 2002.

[9] J. de Ozen, A. Atay, S. Oruc, M. Dalkiz, B. Beydemir, & S. Develi, "Evaluation of pulsed electromagnetic fields on bone healing after implant placement in the rabbit mandibular model," *Turk J Med Sci*, no. 34, pp. 91-95, 2004.

[10] V. Vizcaine, "Biological effects of low frequency electromagnetic fields," *Radiobiología revista electrónica*, pp. 44-46, 2003.

[11] P. Diniz, K. Shomura, K. Soejima, & G. Ito, "Effects of pulsed electromagnetic field (PEMF) stimulation on bone tissue like formation are dependent on the maturation stages of the osteoblasts," *Bioelectromagnetics*, vol. 23, no. 5, pp. 398-405, 2002.

[12] Eficioterapia, *Valor del campo magnético en las fracturas óseas* [página web], 2006 , disponible en http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-fis/camp-magnetico-fracturas.pdf

[13] P. Guillen, J. M. Madrigal, A. Madroñero, J. I. Pitillas, J. M. Gálvez, & J. Llopis, "Aplicaciones de los campos magnéticos. Magnetoterapia y Magnetosteogenia," *Rev. Esp. De Cir. Ost.*, no. 20, pp. 257-279, 1985.

[14] C. T. Brighton, *Electrical properties of bone and cartilage*, Grun & Straton, Inc, pp. 605-615, 1979.

[15] I. Aktas, K. Akgun, & B. Cakmak, "Therapeutic effect of pulsed electromagnetic field in conservative treatment of subcondral impingement syndrome," *Clin Rheumatol*, no. 26, pp.1234-1239, 2007.

[16] F. Burney, Y. Andianne, M. Donkerwolcke, M. Hinsenkam, J. Quintin, F. Schuuind, "The orthopedics-Traumatoloy department," *Rev Med Brux*, no. 23 suplemento 2, pp. 143-147, 2002.

[17] A. C. Jasti, B. J. Wetzel, H. Aviles. D. N. Vesper, G. Nindl, & M. T. Johnson, "Effect of wound healing electromagnetic field on inflammatory cytokine gene expression in rats," *Biomed Sci Instrum*, no. 37, 209-214, 2001.

[18] J. Zhou, L. G. Ming, B. F. Ge, J. Q. Wang, R. Q. Zhu, Z. Wei, H. P. Ma, C. J. Xian, & K. M. Che, "Effects of 50 Hz Sinusoidal electromagnetic fields of different intensities on proliferation, differentiation and mineralization potentials of rat osteoblasts," *Bone*, vol. 49, no. 4, pp. 753-761, 2011.

[19] E. R. Javor, & T. Anderson, *Design of Helmholtz coil for low frequency magnetic field susceptibility testing*, *IEEE*, pp. 912-917, 1998, disponible en http://www.ipen.br/biblioteca/cd/ieee/1999/Proceed/00132.pdf

[20] B. Casañas-Sánchez, "Instrumentación y control de la técnica de la magnetoimpedancia para materiales ferromagnéticos suaves," M. S. Thesis, Ingeniería e Instrumentación, 2012.

[21] S. A. W. Pickering, & B. E. Scammell, "Electromagnetic Fields for Bone Healing," *Lower Extremity Wounds* , vol. 1, no. 3, pp. 152-160, 2002.

[22] The Aluminium Association, "Aluminum magnet conductor, Chapter 14," in *Electromagnetic and other applications fo Aliminuim*, 2017, pp. 14/1-14/3, disponible en http://www.aluminum.org/sites/default/files/aecd14.pdf

[23] W. M. Colnel, & T. Mclyman, *Transformer and inductor design Handbook*, Jet Propulsion Laboratory, California Inst. of Technology, Pasadena California, 2011.

DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS
(DOAJ)

DOAJ is a community-curated
online directory
that indexes
and provides access
to high quality,
open access,
peer-reviewed journals

https://doaj.org/

Científica, vol. 21, núm. 1, pp. 55-62, enero-junio 2017.
eISSN en trámite, ISSN 1665-0654, ESIME Instituto Politécnico Nacional México

Aplicación de la teoría del costo exergético para el análisis de un sistema de refrigeración con subenfriamiento por un enfriador termoeléctrico

Ignacio **Carvajal-Mariscal**[1]
Pedro **Quinto-Diez**[1]
José Eduardo **Flores-Ortega**[2]
Román **Bravo-Cadena**[2]
César Augusto **Real-Ramírez**[3]
Eliseo **Martínez-Espinosa**[4]

[1]Instituto Politécnico Nacional
ESIME, UPALM, Av. IPN, S/N, CP 07738,
Ciudad de México.
MEXICO.
[2]Universidad Tecnológica del Valle del Mezquital
Carr. Ixmiquilpan-Capula km.4 Col. El Nith, Ixmiquilpan,
Hidalgo.
MEXICO.
[3]Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco, Departamento de Sistemas,
Av. San Pablo 180, Reynosa-Tamaulipas, Azcapotzalco,
CP 02200, Ciudad de México.
MEXICO.
[4]Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria,
CP 04510, Ciudad de México.
MEXICO.

Teléfono: 5729-6000 ext. 54884
correos electrónicos (emails): icarvajal@ipn.mx
pqd510@yahoo.com.mx, jefo64@gmail.com
romanbravoc@hotmail.com, cesar.real@gmail.com
emartineze@iingen.unam.mx

Recibido 26-04-2016, aceptado 29-10-2016.

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del análisis termoeconómico realizado a un sistema de refrigeración por compresión de vapor con una capacidad de 1 tonelada de refrigeración, al que se le ha instalado un enfriador termoeléctrico para subenfriar el refrigerante a la salida del condensador. Se estudiaron dos condiciones de subenfriamiento: de 5 y de 8°C. Para el análisis termoeconómico se aplicó la Teoría del Costo Exergético desarrollada por el doctor Antonio Valero Capilla de la Universidad de Zaragoza, España. Los resultados experimentales mostraron que al instalar el enfriador termoeléctrico aumenta el efecto refrigerante del sistema sin requerir mayor trabajo por parte del compresor, lo que incrementa el coeficiente de desempeño (COP) del sistema de refrigeración hasta 7.2%. Sin embargo, del estudio termoeconómico se observó que los costos exergéticos unitarios resultantes de subenfriar el refrigerante con un enfriador termoeléctrico, se incrementan hasta 26% con respecto a la operación normal del sistema sin subenfriamiento. Se concluye que es recomendable subenfriar el refrigerante con un enfriador termoeléctrico sólo en caso que para la alimentación de este dispositivo se aproveche alguna fuente alterna de energía que no implique un costo extra.

Palabras clave: sistema de refrigeración, subenfriamiento, enfriador termoeléctrico, análisis termoeconómico, teoría del costo exergético.

Abstract (Application of Exergetic Cost Theory to Analyze a Refrigeration System with Subcooling by a Thermoelectric Cooler)

This paper presents the results of thermoeconomic analysis of a vapor compression refrigeration system with a capacity of 1 ton of cooling, in which was installed a thermoelectric cooler to subcool the refrigerant at the condenser outlet. Two conditions of subcooling were studied with 5 and 8°C. For the thermoeconomic analysis the Theory of Exergetic Cost developed by Dr. Antonio Valero Chapel of University of Zaragoza, Spain, was applied. The experimental results showed that installing the thermoelectric cooler increases the cooling effect of the system without requiring further work by the compressor, which increases the refrigeration system coefficient of performance (COP) up to 7.2%. However, from the thermoeconomic study it was found that unit exergetic costs resulting from subcooled refrigerant using a thermoelectric cooler, increase to 26% with respect to the normal system operation without subcooling. We conclude that it is advisable to subcool the refrigerant with a thermoelectric cooler only in case that for the power of this device is used any alternative energy source that does not involve an extra cost.

Index terms: refrigeration system, subcooling, thermoelectric cooler, thermoeconomic analysis, exergetic cost theory.

1. Introducción

Mundialmente, el consumo de energía se ha incrementado de manera considerable debido principalmente al aumento de la población y de la industria. Del total de la energía consumida en un hogar en México, aproximadamente 30% corresponde a los equipos de aire acondicionado y refrigeración [1]. Este hecho ha conducido a la exploración de varias alternativas para hacer más eficientes los equipos de refrigeración y aire acondicionado y entre otras se han propuesto las siguientes: diseñar nuevos compresores, intensificar la transferencia de calor en el evaporador y condensador, mejorar el dispositivo de expansión, modular la capacidad del sistema y subenfriar el refrigerante a la salida del condensador.

Esta última alternativa presenta varias ventajas y es evidente que mientras mayor sea el subenfriamiento del líquido, mayor será el efecto refrigerante. En la Fig. 1 se muestra el ciclo de refrigeración convencional comparado con otro en el cual el líquido es subenfriado antes de que llegue a la válvula de expansión del refrigerante. Con los puntos 1, 2, 3 y 4 se designa al ciclo convencional, mientras que los puntos 1´, 2´, 3 y 4 describen el ciclo con subenfriamiento. Como se sabe, en el proceso de 1-2 ocurre la expansión del fluido de trabajo en la válvula de expansión, en el proceso de 2-3 se evapora el refrigerante al absorber el calor del medio que se refrigera, en el proceso de 3-4 se lleva a cabo la compresión del vapor y finalmente en el proceso de 4-1 el refrigerante se condensa e inicia de nuevo el ciclo. El subenfriamiento se representa con el proceso de 1-1´.

Existen varias formas de lograr un mayor subenfriamiento del refrigerante líquido, por ejemplo, agregar pequeños equipos de refrigeración o intercambiadores de calor adicionales enfriados por agua o aire [2], [3]. En este contexto, actualmente han

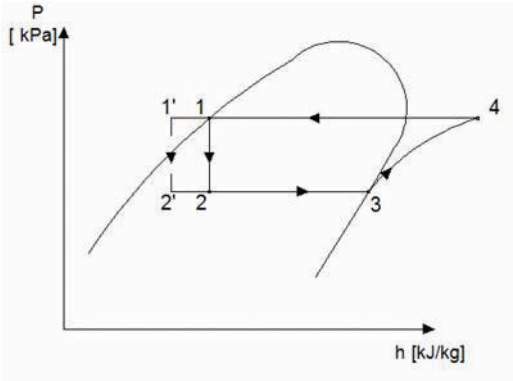


Fig. 1. Comparación entre el ciclo de refrigeración convencional y con subenfriamiento.

adquirido importancia los enfriadores termoeléctricos que pueden funcionar como intercambiadores de calor. Su principal ventaja sobre otros equipos es que se puede controlar el subenfriamiento del refrigerante de manera simple, regulando la corriente eléctrica suministrada a los módulos termoeléctricos.

Recientemente, varios investigadores han estudiado experimentalmente la posibilidad de instalar enfriadores termoeléctricos para subenfriar el fluido de trabajo en sistemas de refrigeración de distintas capacidades y con diferentes refrigerantes [4], [5], [6], [7]. Como resultado, en general se ha encontrado que se incrementa el coeficiente de operación (COP) del sistema de refrigeración entre 5 y 10% con respecto al sistema de refrigeración sin subenfriamiento. Sin embargo, estos resultados se deben tomar con las debidas reservas pues se requiere un análisis adicional para evaluar la viabilidad en la implementación de esta tecnología.

Un método efectivo de análisis de la influencia de los enfriadores termoeléctricos sobre el comportamiento del ciclo de refrigeración, es la aplicación de la Teoría del Costo Exergético, cuyos fundamentos se muestran en la referencia [8]. Concretamente, este método ha sido utilizado por varios investigadores para analizar sistemas de aire acondicionado y refrigeración de diferentes características y condiciones de operación [9], [10], [11], [12]. De acuerdo con la revisión de la literatura especializada, hasta la fecha no se ha hecho un estudio termoeconómico de un sistema de refrigeración con un enfriador termoeléctrico como intercambiador de calor.

De lo anteriormente mencionado resultó la motivación de este trabajo que consiste en realizar el análisis termoeconómico, aplicando la Teoría del Costo Exergético, de un sistema de refrigeración que incluye un enfriador termoeléctrico para subenfriar el refrigerante líquido a la salida del condensador.

2. Investigación experimental

Los datos usados en el análisis termoeconómico se obtuvieron de un sistema de refrigeración industrial con una capacidad de una tonelada de refrigeración, cuyo fluido de trabajo es el refrigerante M049Plus. Este equipo tiene la posibilidad de poder variar la velocidad del ventilador del condensador y por lo tanto el flujo de aire que se suministra al condensador, con lo cual se pueden simular las condiciones en que opera durante el año. En la investigación experimental se ensayaron tres porcentajes del flujo de aire de enfriamiento hacia el condensador: 25, 50 y 100 %.

Para alcanzar el subenfriamiento deseado se empleó un enfriador termoeléctrico que posee ocho módulos termoeléctricos conectados en paralelo que forman una superficie de intercam-

Tabla 1. Valores del COP sin subenfriamiento, para 5ºC y 8ºC de subenfriamiento.

Ciclo de refrigeración	5ºC de subenfriamiento	8ºC de subenfriamiento
25% del flujo de aire de enfriamiento al condensador		
Sin subenfriamiento	4.52	
Con subenfriamiento	4.75	4.89
50% del flujo de aire de enfriamiento al condensador		
Sin subenfriamiento	4.71	
Con subenfriamiento	4.94	5.08
100% del flujo de aire de enfriamiento al condensador		
Sin subenfriamiento	4.83	
Con subenfriamiento	5.06	5.20

bio de calor de 0.034 m^2. Para esta investigación experimental se eligieron dos valores de subenfriamiento del refrigerante líquido: 5 y 8 ºC.

Para mayores detalles sobre la instalación e investigación experimental consulte el trabajo de Oscar José [13]. Los valores del coeficiente de operación (COP) para cada condición se muestran en la Tabla 1.

Se puede determinar que al instalar el enfriador termoeléctrico el efecto refrigerante del sistema aumenta sin requerir mayor trabajo por parte del compresor ya que no se aumenta el flujo de refrigerante, en consecuencia, se incrementa el COP del sistema de refrigeración hasta en 7.2% para el caso de 8ºC de subenfriamiento.

3. Análisis termoeconómico

A continuación se muestra el análisis termoeconómico del sistema de refrigeración sin subenfriamiento y con subenfriamiento. Para mayores detalles consulte el trabajo de Claudio Ledezma [14].

3.1. Sistema de refrigeración sin subenfriamiento

El análisis termoeconómico se inicia definiendo la estructura productiva del sistema de refrigeración sin subenfriamiento. Para esto se deben hacer ciertas consideraciones previas del proceso productivo de cada elemento físico del sistema, catalogando cada flujo que entra o sale como combustible (W) o producto (B). Usando entonces el diagrama de flujo básico del sistema de refrigeración por compresión de vapor sin subenfriamiento se muestran los respectivos combustibles, W, y productos del sistema, B, en la Fig. 2.

A partir del diagrama de la Fig. 2, se construye el diagrama productivo, Fig. 3. Los respectivos combustibles y productos, de acuerdo a la nomenclatura usada en termoeconomía, se muestran en la Tabla 2. Se considera que el sistema se compone de cuatro unidades productivas y dos elementos ficticios los cuales son agregados para un mismo producto que se distribuye en más de una unidad productiva (el caso de $\dot{S}$ y $\dot{B}_1$).

El condensador es un componente disipativo que no tiene un producto útil definido y desde un punto de vista funcional su objetivo es disipar calor. Entonces para el análisis realizado se considera que el objetivo del condensador es "recuperar la entropía generada" a lo largo del sistema de refrigeración por cada uno de los equipos. Tomando en cuenta la consideración anterior, se le representa al condensador por el ele-

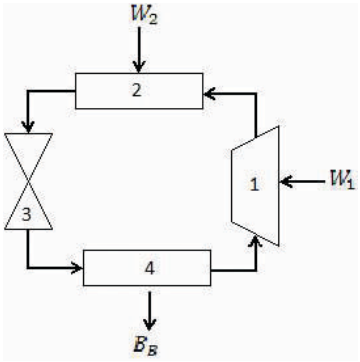


Fig. 2. Diagrama del sistema de refrigeración sin subenfriamiento. 1) Compresor; 2) condensador; 3) válvula de expansión; 4) evaporador.

Tabla 2. Definición Producto-Recurso del sistema sin subenfriamiento.

Elemento	Recurso (kW)		Producto (kW)
	Flujo exergético	Flujo neguentrópico	
1. Compresor	$\dot{W}_1$	$\dot{S}_0 = \dot{m}T_0\,(s_4 - s_3)$	$\dot{B}_1 = \dot{m}(b_4 - b_3)$
2. Condensador	$\dot{W}_2$ $\dot{B}_2 = \dot{m}(b_4 - b_1)$		$\dot{S} = \dot{m}T_0\,(s_1 - s_2)$
3. Válvula	$\dot{B}_3 = \dot{m}(b_1 - b_2)$	$\dot{S}_1 = \dot{m}T_0\,(s_1 - s_2)$	$\dot{B}_5 = \dot{m}(b_1 - b_2)$
4. Evaporador	$\dot{B}_4 = \dot{m}(b_2 - b_3)$ $B_5 = \dot{m}(b_1 - b_2)$	$\dot{S}_2 = \dot{m}T_0\,(s_3 - s_2)$	$\dot{B}_B$
5. Punto de convergencia	$\dot{B}_1$		$\dot{B}_2 + \dot{B}_3 + \dot{B}_4$
6. Punto de convergencia		$\dot{S}$	$\dot{S}_0 + \dot{S}_1 + \dot{S}_2$
Sistema de refrigeración	$\dot{W}_1 + \dot{W}_2$		$\dot{B}_B$

mento (2) en un nivel de agregación máximo en conjunto con el ventilador que provee el flujo de aire para enfriamiento.

El propósito definido del condensador es rechazar el incremento de entropía del refrigerante, esto es, generar el cambio de entropía necesario para la operación cíclica del sistema ($\dot{S}_0 + \dot{S}_1 + \dot{S}_2$). Por lo tanto, el costo del flujo de calor disipado en el condensador se imputará al producto de los equipos correspondientes.

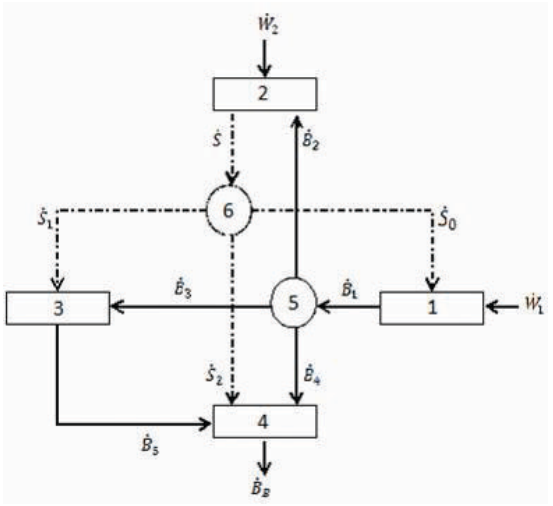


Fig. 3. Estructura productiva del sistema de refrigeración sin subenfriamiento.

El flujo $\dot{B}_1$, producto del incremento de la presión del refrigerante a su paso por el compresor (1) se divide en los flujos $\dot{B}_2$ $\dot{B}_3$ y $\dot{B}_4$ en el elemento ficticio 5, los cuales son los flujos de combustible en el condensador, válvula de expansión y evaporador respectivamente.

Con base en el diagrama productivo del sistema (véase Fig. 3), los resultados de la experimentación y con las consideraciones antes mencionadas, se realiza el planteamiento de la matriz de incidencia y al obtener su solución se obtienen finalmente los costos exergéticos unitarios *k** (véase Tabla 3).

En su cálculo se utilizaron los datos obtenidos de la investigación experimental de la referencia [13], para calcular las exergías de flujo y se consideraron las temperaturas del ambiente que se registraron durante los experimentos. Los flujos exergéticos se calcularon siguiendo las definiciones de Producto-Recurso.

Tabla 3. Costos exergéticos de los flujos en el sistema sin subenfriamiento.

	25% del flujo de aire de enfriamiento			50% del flujo de aire de enfriamiento			100% del flujo de aire de enfriamiento		
Flujo	***B*(kW)**	***B**(kW)**	***k****	***B*(kW)**	***B**(kW)**	***k****	***B*(kW)**	***B**(kW)**	***k****
W_1	0.7200	0.7200	1.0000	0.7000	0.7000	1.0000	0.6900	0.6900	1.0000
W_2	0.0015	0.0015	1.0000	0.0030	0.0030	1.0000	0.0060	0.0060	1.0000
B_1	0.5306	0.7200	1.3571	0.5511	0.7000	1.2702	0.5539	0.6900	1.2458
B_2	0.0799	0.0834	1.0428	0.0554	0.0619	1.1173	0.0537	0.0560	1.0435
B_3	0.1040	0.1085	1.0428	0.0908	0.1014	1.1173	0.0823	0.0859	1.0435
B_4	0.5064	0.5281	1.0428	0.5157	0.5762	1.1173	0.5253	0.5481	1.0435
B_5	0.1040	0.1115	1.0713	0.0908	0.0971	1.0705	0.0823	0.0877	1.0664
S	0.1353	0.0854	0.6309	0.1269	0.0649	0.5114	0.1198	0.0620	0.5178
S_1	0.1353	0.0030	0.0219	0.1269	0.0021	0.0165	0.1198	0.0019	0.0157
S_2	3.7684	0.0824	0.0219	3.7993	0.0628	0.0165	3.8197	0.0601	0.0157
B_B	0.1353	0.7220	5.3359	0.1269	0.7030	5.5412	0.1198	0.6960	5.8106

3.2. Sistema de refrigeración con subenfriamiento

Al agregar al sistema un enfriador termoeléctrico para subenfriamiento del refrigerante, se añade una unidad productiva al sistema, (3), de la cual se considerará su combustible el flujo $\dot{W}_3$ (véase Fig. 4). El enfriador termoeléctrico se conecta en serie a la salida del condensador, conservando sin cambio los otros componentes en su posición relativa en el sistema. De nueva cuenta, es posible construir el diagrama productivo del sistema, ahora con la consideración de ue el combustible del enfriador termoeléctrico es el flujo $\dot{W}_3$ y su producto el flujo $\dot{S}_B$ Este último se suma al producto del condensador y se concentra en el elemento ficticio (7) para repartirse como un producto homogéneo en las diferentes unidades productivas del sistema (véase Fig. 5).

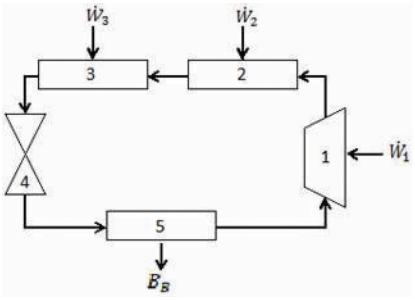


Fig. 4. Diagrama del sistema de refrigeración con subenfriamiento.

De la Fig. 5 se puede inferir que el diagrama productivo del sistema con subenfriamiento usando un enfriador termoeléctrico (elemento 3) resulta ser el mismo para ambas condiciones, 5 y 8°C de subenfriamiento, consideradas en esta investigación.

La Tabla 4 muestra la definición de productos y combustibles del sistema con subenfriamiento, donde se observa cómo se

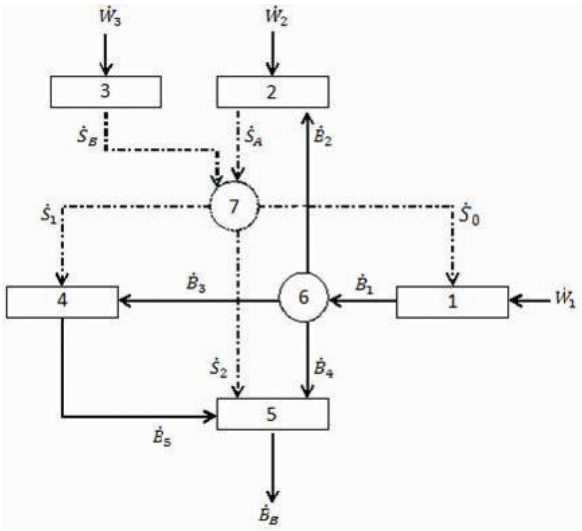


Fig. 5. Estructura productiva del sistema de refrigeración con subenfriamiento.

Tabla 4. Definición Producto-Recurso del sistema con subenfriamiento.

Elemento	Recurso (kW)		Producto (kW)
	Flujo exergético	Flujo neguentrópico	
1. Compresor	$\dot{W}_1$		$\dot{B}_1 = \dot{m}(b_4 - b_3)$
2. Condensador	$\dot{W}_2$ $\dot{B}_2 = \dot{m}(b_4 - b_1)$		$\dot{S}_A = \dot{m}T_0\ (s_4 - s_1)$
3. Enfriador termoeléctrico	$\dot{W}_3$		$\dot{S}_B = \dot{m}T_0\ (s_1 - s_{1'})$
4. Válvula	$\dot{B}_3 = \dot{m}(b_{1'} - b_{2'})$	$\dot{S}_1 = \dot{m}T_0\ (s_{1'} - s_{2'})$	$\dot{B}_5 = \dot{m}(b_{1'} - b_{2'})$
4. Evaporador	$\dot{B}_4 = \dot{m}(b_{2'} - b_{3'})$ $B_5 = \dot{m}(b_{1'} - b_{2'})$	$\dot{S}_2 = \dot{m}T_0\ (s_3 - s_2)$	$\dot{B}_B$
5. Punto de convergencia	$\dot{B}_1$		$\dot{B}_2 + \dot{B}_3 + \dot{B}_4$
6. Punto de convergencia		$\dot{S}_A + \dot{S}_B$	$\dot{S}_1 + \dot{S}_2$
Sistema de refrigeración	$\dot{W}_1 + \dot{W}_2 + \dot{W}_3$		$\dot{B}_B$

Tabla 5. Costos exergéticos de los flujos en el sistema con 8°C de subenfriamiento en diferentes condiciones de operación del ventilador del condensador.

	25% del flujo de aire de enfriamiento			50% del flujo de aire de enfriamiento			100% del flujo de aire de enfriamiento		
Flujo	***B*(kW)**	***B**(kW)**	***k****	***B*(kW)**	***B**(kW)**	***k****	***B*(kW)**	***B**(kW)**	***k****
W_1	0.7200	0.7200	1.0000	0.7000	0.7000	1.0000	0.6900	0.6900	1.0000
W_2	0.0015	0.0015	1.0000	0.0030	0.0030	1.0000	0.0060	0.0060	1.0000
W_3	0.4150	0.4150	1.0000	0.4150	0.4150	1.0000	0.4150	0.4150	1.0000
B_1	0.5306	0.7200	1.3571	0.5511	0.7000	1.2702	0.5539	0.6900	1.2458
B_2	0.0799	0.0832	1.0407	0.0554	0.0584	1.0553	0.0537	0.0562	1.0469
B_3	0.1319	0.1373	1.0407	0.0516	0.0544	1.0553	0.0420	0.0440	1.0469
B_4	0.4800	0.4995	1.0407	0.5563	0.5871	1.0553	0.5634	0.5898	1.0469
B_5	0.1319	0.1577	1.1955	0.0516	0.0649	1.2570	0.0420	0.0513	1.2224
S_A	0.1603	0.0852	0.5313	0.0848	0.0614	0.7246	0.0599	0.0622	1.0387
S_B	0.2686	0.4152	1.5459	0.2557	0.4152	1.6235	0.2469	0.4152	1.6818
S_1	0.1603	0.0204	0.1274	0.0848	0.0104	0.1227	0.0599	0.0074	0.1231
S_2	3.7684	0.4800	0.1274	3.7993	0.4662	0.1227	3.8197	0.4700	0.1231
B_B	0.4289	1.1365	2.6496	0.3405	1.1180	3.2830	0.3068	1.1110	3.6216

añaden las ecuaciones correspondientes al combustible y producto del enfriador termoeléctrico y sus correspondencias con los demás elementos. También al flujo total de combustible del sistema de refrigeración se le añaden los recursos consumidos por el enfriador termoeléctrico.

A continuación mediante el diagrama productivo y las ecuaciones planteadas en la tabla anterior, se construye la matriz de incidencia y se obtienen los costos energéticos del sistema de refrigeración con subenfriamiento por un enfriador termoeléctrico.

Como se mencionó anteriormente, las temperaturas de subenfriamiento a las cuales fueron realizados los cálculos son 5 y 8°C. Cada valor de subenfriamiento proporciona diferentes costos exergéticos en los flujos, lo cual se debe al cambio en los recursos consumidos en el sistema de refrigeración a las distintas condiciones de subenfriamiento del refrigerante y por tanto del producto total del sistema. En la Tabla 5 se muestran solo los resultados del caso con 8°C donde se obtuvo el mayor incremento en el COP al realizar las pruebas experimentales.

Se puede ver que al añadir el enfriador termoeléctrico para provocar el subenfriamiento, aumenta el COP sin requerir más trabajo por parte del compresor, pero para lograr esto se necesita un flujo exergético extra el cual aumenta los costos exergéticos de los recursos requeridos por las demás unidades del sistema.

Con la intención de hacer una comparación que permita analizar la influencia de la adición del enfriador termoeléctrico en el incremento del costo exergético del sistema, se calcularon los costos exergéticos unitarios de los componentes del sistema. En la Tabla 6 se muestra solo el caso con 8°C de subenfriamiento y para la condición de 100% del flujo de aire del ventilador del condensador.

Se puede notar que el costo exergético del producto del enfriador termoeléctrico, k_p^*, es 26% mayor que el que presenta el compresor, lo que indica que desde el punto de vista del uso eficiente de la energía no resulta conveniente la aplicación de un enfriador termoeléctrico para subenfriar el refrigerante después del condensador en un sistema de refrigeración por compresión de vapor. Sin embargo, en el caso que la fuente de alimentación del enfriador termoélectrico sea una fuente de energía alterna (solar, eólica, etc.), que se puede considerar "gratis", se justificaría plenamente su aplicación para incrementar la eficiencia termodinámica del sistema de refrigeración.

4. Conclusiones

A partir del estudio experimental y termoeconómico de un sistema de refrigeración por compresión utilizando un enfriador termoeléctrico para subenfriamiento del refrigerante, con dos valores de subenfriamiento (5 y 8°C), se concluyó lo siguiente:

- La implementación del enfriador termoeléctrico aumenta el efecto refrigerante del sistema sin requerir un mayor trabajo por parte del compresor, pudiendo alcanzar hasta un 7.2% en el incremento del COP comparado con el sistema sin subenfrimiento. Sin embargo, al realizar el estudio termoeconómico del sistema se observó que los costos exergéticos unitarios resultantes de usar el enfriador termoeléctrico son incluso mayores, en 26% para el caso con 8°C de subenfriamiento y para la condición de 100% del flujo de aire del ventilador del condensador, que los relacionados con el funcionamiento del compresor.

- Al aumentar el nivel de subenfriamiento usando el enfriador termoeléctrico se incrementa la cantidad de recursos suministrados al sistema sin presentar una ventaja en términos de costos exergéticos como la que se observa con la variación del flujo de aire del ventilador del condensador.

- Queda abierta la posibilidad de aplicar el enfriador termoeléctrico para alcanzar un subenfriamiento en el refrigerante pero con la consideración de que el suministro de energía provenga de una fuente alterna (solar, eólica, etc.) para no aumentar el costo exergético de los recursos.

Tabla 6. Costos exergéticos unitarios de los componentes del sistema de refrigeración. 8°C de subenfriamiento y 100% del flujo de aire del ventilador del condensador.

Componente	B_F^*(kW)	B_p^*(kW)	k_F^*	k_p^*
Compresor	0.6900	0.6900	1.0000	1.2458
Condensador	0.0622	0.0622	1.0422	1.0387
Enfriador termoeléctrico	0.4150	0.4152	1.0000	1.6818
Válvula de expansión	0.0440	0.0513	1.0469	1.2224
Evaporador	0.6412	1.1110	1.0591	3.6216

Agradecimientos

Los autores deseamos expresar su agradecimiento al Instituto Politécnico Nacional (IPN) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo recibido para realizar esta investigación.

Referencias

[1] Sistema de Información Energética. *Balance Nacional de Energía: Indicadores económicos y energéticos*. Disponible en: http://sie.energia. gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua =IE0C01. Consultado el 19 septiembre 2016.

[2] J. R. Khan, & S. M. Zubair, "Thermodynamic optimization of finite time vapor compression refrigeration systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 42, no. 12, pp. 1457-1475, 2001.

[3] R. Selbas, O. Kizilkan, & A. Sencan, "Thermoeconomic Optimization of Subcooled and Superheated Vapor Compression Refrigeration Cycle," *Energy*, vol. 31, no. 12, pp .2108-2128, 2006.

[4] J. Winkler, V. Aute, B. Yang, & R. Radermacher, "Potential Benefits of Thermoelectric Element Used With Air-Cooled Heat Exchangers", *Proceedings of International Refrigeration and Air Conditioning Conference* at Purdue, Purdue University, USA, pp. 1-8, 2006.

[5] R. Rosca, I. Tenu, P. Carlescu, E. Rakpsi, & Gh. Manolache, "Assessment of the Subcooling Capabilities of a Thermoelectric Device in a Vapour Compression Refrigeration System," *Lucrari Stiintifice seria Agronomie*, vol. 51, pp. 224-229, 2007.

[6] J. Schoenfeld, J. Muehlbauer, Y. Hwang, & R. Radermacher, "Integration of a Thermoelectric Sub cooler Into a Carbon Dioxide Transcritical Vapour Compression Cycle Refrigeration System", *Proceedings of International Refrigeration and Air Conditioning Conference* at Purdue, Purdue University, USA, pp. 1-7, 2008.

[7] H. Brijesh Patel, & S. Lalit Patel, "Experimental Investigation of Sub Cooling Effect on Simple Vapour Compression System by Domestic Refrigerator," *Indian Journal Research*, vol. 3, no. 3, 2013.

[8] M. A. Lozano, & A. Valero, *Thermoeconomic analysis of a gas turbine cogeneration system*. ASME Book no. H00874, 1993.

[9] M. D. D'accadia, & F. De Rossi, "Thermoeconomic analysis and diagnosis of a refrigeration plant", *Energy Conversion and Management*, vol. 39, no. 12, pp. 1223-1232, 1998.

[10] R. D. Misra, P. K. Sahoo, & A. Gupta, "Application of the exergetic cost theory to the LiBr/H2O vapour absorption system", *Energy*, vol. 27, pp. 1009-1025, 2002.

[11] T. Ommen, & B. Elmegaard, "Numerical model for thermoeconomic diagnosis in commercial transcritical/subcritical booster refrigeration systems", *Energy Conversion and Management*, vol. 60, pp. 161-169, 2012.

[12] A. Piacentino Antonio, & M. Talamo, "Critical analysis of conventional thermoeconomic approaches to the diagnosis of multiple faults in air conditioning units: Capabilities, drawbacks and improvement directions. A case study for an air-cooled system with 120 kW capacity", *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, pp. 24-44, 2013.

[13] J. Pineda, "Estudio experimental del incremento de eficiencia en un sistema de refrigeración al integrar un módulo termoeléctrico", Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, 2011.

[14] C. Ledezma-Cabrera, "Estudio termoeconómico de un sistema de refrigeración con módulo termoeléctrico para subenfriamiento del refrigerante", Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, 2012.

DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS
(DOAJ)
https://doaj.org/

IPN

80

Años

1936-2016

ESIME

100

Años

1916-2016

Sistema de Información Científica

Redalyc

Red de Revistas Científicas
de América Latina y el Caribe,
España y Portugal

cuenta con:

1138 revistas científicas
38 624 fascículos
496 751 artículos
a texto completo

www.redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas
de América Latina y el Caribe,
España y Portugal

XML JATS en Redalyc

Redalyc ha emprendido una transición y se suma al estándar XML JATS, bajo la especificación JATS4R, lenguaje de metamarcado con reglas simples, que provee de un método uniforme para describir e intercambiar datos estructurados

xmljatsredalyc.org

REDALYC 3.0

Indicaciones para los autores que deseen publicar en Científica

La revista *Científica* es una publicación semestral editada por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México, que presenta trabajos de investigación y propuestas originales e inéditas de la Ingeniería Eléctrica, Mecánica, en Sistemas, Electrónica, en Telecomunicaciones y de la Educación en Ingeniería.

Los manuscritos pueden estar escritos en español o inglés y se reciben en formato electrónico (archivo digital adjunto), por medio del correo electrónico revistacientifipn@yahoo.com.mx con atención al Comité Editorial (Tel. (+52) 55 5729 6000 ext. 54518; Edificio 5, 1er Piso, oficina de la revista *Científica*; Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la ESIME Zacatenco, Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CP 07738, Ciudad de México, México).

Los trabajos recibidos son revisados por el Comité Editorial quienes designan a un Editor Asociado (que desconoce tanto la autoría y procedencia de los manuscritos) de acuerdo a la disciplina que cubren los artículos. El Editor Asociado selecciona dos árbitros para que evalúen el escrito (por pares ciegos). Los trabajos pueden ser aceptados para su publicación, aceptados si se realizan modificaciones necesarias o rechazados. La aceptación está sujeta a la aprobación, en todos los casos, de dos revisores; cuando no hay consenso entre los dos primeros revisores el Editor Asociado resuelve el dictamen. Los trabajos deben ser investigaciones o propuestas originales inéditas, sin excepción, sobre las áreas mencionadas y no pueden estar sujetas a revisión en ninguna otra publicación de forma simultánea; además, el resultado del proceso de arbitraje es inapelable y se sujeta, estrictamente, a las políticas dictadas por el Comité Editorial en funciones. Una vez aceptado un artículo, el autor o autores transfieren los derechos de publicación a la institución editora que está representada por el Editor en Jefe de la revista, los artículos estarán bajo una 'Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional '.

Estructura de los artículos

Los manuscritos deben contener los siguientes elementos: *título*, *datos de los autores*, *resumen* (con palabras clave en español), *abstract* (con palabras clave en inglés: *index terms*), *introducción*, los apartados correspondientes al *desarrollo*, *conclusiones* y *referencias*. Dentro del artículo se numeran, solamente, las secciones desde la introducción hasta las conclusiones.

Título
El título debe ser lo más corto posible (sin utilizar abreviaturas de preferencia) y no exceder de tres líneas.

Datos del autor
Se muestran el o los nombres completos de los autores (sin abreviaturas y distinguiendo los nombres de los apellidos con letras en 'negrita': Nombre **Apellido**), la dirección postal de la institución a la cual pertenecen, país, el teléfono (con la clave internacional de su país) y correo electrónico. En el caso de dos autores o más (de diversas instituciones), se deben mencionar los datos completos de cada uno.

Resumen
Debe contener 250 palabras como máximo. Consiste en una pequeña descripción de la investigación y una breve información de los resultados del trabajo que permite a los lectores identificar con rapidez los aspectos fundamentales del artículo y discernir su relevancia.

Abstract
Se incluye el resumen en inglés.

Palabras clave (Index Terms)
Se deben incluir de tres a cinco descriptores del trabajo en español e inglés.

Declaración de subvenciones
Se debe indicar si el trabajo ha sido realizado con la ayuda de una subvención o fondo especial.

Introducción
Expresa los antecedentes, límites, alcances y relevancia del problema. Plantea las premisas del mismo y el objetivo del trabajo. Se sugiere no extenderla como si fuera una exposición analítica.

Desarrollo
Se refiere al desarrollo del tema que puede ser teórico, experimental, teórico-experimental o la descripción de un nuevo diseño.

Conclusiones
Se establece la respuesta global del problema, son los objetivos alcanzados, las hipótesis comprobadas, modificadas o rechazadas.

Referencias
Es la lista de fuentes bibliográficas: artículos, libros, memorias de congresos, etcétera. Deben aparecer en el orden en el cual se mencionan dentro del artículo, señalándose con el número entre corchetes [1], con las siguientes especificaciones (*IEEE Editorial Style Manual*, AENOR UNE-ISO 690):

Artículo de revista científica:

[1] A. Autor, "Nombre del artículo," *Nombre de la revista*, volumen, número, páginas, mes, año. [en línea]. Disponible en: URL. Consultado: día mes, año.

Ejemplo:

[1] R. Ponce-Morales, F. Sánchez-Silva, I. Carvajal-Mariscal, M. Toledo-Velázquez, and J. S. Cruz-Maya, "Estudio experimental de la reducción de fricción en la conducción de fluidos usando surfactantes," *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*, vol. 4, no. 6, pp. 205-217, junio, 2014. [en línea]. Disponible en: http://www.redalyc.org/revista.oa?id=768&idp=1. Consultado: 20 octubre, 2014.

Libro:

[2] A. Autor, *Título del libro*, número de edición. Ciudad: Editorial, año. [en línea]. Disponible en: URL. Consultado: día mes, año.

Ejemplo:

[2] J. P. Alperin, D. Babini, and G. E. Fischman, *Indicadores de acceso abierto y comunicaciones académicas en América Latina*, 1ª ed., Buenos Aires: CLACSO, 2014. [en línea]. Disponible en: http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/se/20141217052547/Indicadores_de_acceso_abierto.pdf. Consultado: 5 febrero, 2015.

Tesis:

[3] A. Autor, "Título de la tesis," grado, departamento, institución, ciudad de la institución, país, año. [en línea]. Disponible en: URL. Consultado: día mes, año.

Ejemplo:

[3] O. I. López-Suárez, "Análisis del desempeño de una prótesis cardíaca en posición aórtica," tesis de maestría, Depto. Ing. Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2010. [en línea]. Disponible en: http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/handle/123456789/10306. Consultado: 17 junio, 2013.

Memorias en congreso:

[4] A. Autor, "Nombre de la ponencia," en *Nombre del Congreso*, ciudad, país, periodo, año [en línea]. Disponible en: URL. Consultado: día mes, año.

Ejemplo:

[4] S. Agrawal, P. Chaporkar, and R. Udwani, "Call admission control for real-time applications in wireless network," en *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*, Turín, Italia, 14-19 abril, 2013. [en línea]. Disponible en: doi, 10.1109/INFCOM.2013.6566789. Consultado: 28 noviembre, 2014.

Agradecimientos

Los agradecimientos se consideran dentro del cuerpo del artículo y se incorporan después de las conclusiones.

Anexos

Los anexos (nomenclatura, simbología, notación) se consideran parte del artículo.

Otras consideraciones

El trabajo se entrega en un procesador de textos (*word*) con páginas en tamaño 'carta' con tipo de letra 'Times New Roman' de 10 puntos, interlineado sencillo y espacio entre párrafos sin sangría (párrafo moderno), alineados a la izquierda, se puede solicitar la plantilla para manuscritos al correo electrónico de la revista revistacientifipn@yahoo.com.mx.

Las ecuaciones y fórmulas se enumeran para mayor claridad, deben encontrarse en formato editable, no como imágenes; los acrónimos y abreviaciones deben definirse la primera vez que sean usados en el texto.

Las figuras deben aparecer en el cuerpo del manuscrito y, además, entregarse en archivos por separado (.tif, .jpeg), es importante que al pasar cualquier imagen por un escáner debe hacerlo con una resolución de 300 ppp (puntos por pulgada). Las tablas deben aparecer en el documento en formato editable.

Los pies de las figuras deben estar debajo de estas con la indicación 'Fig. 1'; además, el título de los ejes en figuras a menudo es causa de confusión, por lo que se sugiere usar palabras en lugar de símbolos. Los encabezados de las tablas deben estar arriba de estas. Se requiere el uso, en todo caso, de símbolos (SI) en lugar de abreviaturas.

En el formato de las referencias se han considerados los lineamientos del *IEEE Editorial Style Manual* (2014) del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y las especificaciones de la norma UNE-ISO 690 (2013) para su adaptación al español, traducida por la Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.

Científica considera que el material utilizado por los autores para su publicación está debidamente autorizado para tal propósito y le corresponde a los autores, no a *Científica*, obtener los permisos correspondientes para dicho material.

La revista *Científica* realizará las modificaciones editoriales pertinentes para el diseño de los manuscritos en el formato vigente.

Information for Authors Submitting Papers to Científica Journal

Científica is a biannual Journal sponsored by the Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) of Instituto Politécnico Nacional Mexico, it publishes theoretical and experimental research on Electromechanical and Electronics Engineering, Computer Engineering, Telecommunications, and also Education in Engineering.

Manuscripts could be written in English or Spanish and sent by email to revistacientifipn@yahoo.com.mx addressed to the Editorial Board [Tel. (+52) 55 5729 6000 ext. 54518; Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), ESIME Zacatenco, Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CP 07738, Mexico City, DF, Mexico].

Papers are reviewed by the Editorial Board and sent to an Associate Editor (AE doesn't know authors and their affiliations), he chooses two referees (blind peer review) selected for their expertise in a given field and reports to the Editorial Board the results. Authors should only submit original work that has neither appeared elsewhere for publication, nor which is under review for another refereed journal. Author accepts sending his/her paper the Editorial Board Policies. Once a manuscript has received the final approval of the reviewers and Editor-in-Chief, the author will be notified and sent a copyright form, in any event, authors must transfer copyright to *Científica*, papers will be shared by a Creative Commons License 'Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)'.

Manuscripts

The manuscript must be prepared in a *word* format with the sections, starting with an abstract, as shown below:

- **Abstract**
- ***Resumen* (Spanish abstract)**
- **Introduction**
- **Body of the manuscript**
- **Conclusions**
- **References**

Title

Must be concise and no longer than 3 lines using capital and lower case letters.

Authors' Name and Affiliations

The authors' name must be written below the title using a one column format staring with the given name followed by one or two family names, if two family names applies, they should be joined by a hyfen (family names must be in **bold** type). Below the authors names must be written the affiliation including the address quality, fax, telephone number and email.

Abstract

The abstract with about 250 words must give a brief description about the research including some comments about the experimental or simulation results and conclusion.

Resumen (Spanish abstract)

It is desirable that, if it is possible, a Spanish abstract be provided.

Index Terms (*palabras clave*)

All papers must contain index terms as provided by the authors. They must be incorporated in Spanish too.

Financial support

All financial support for the work must be listed here and not in the acknowledgment at the end of the paper.

Body of the Manuscript

The body of the manuscript must include an introduction in which the relevance of the research must be explained. A review of related research works by either, the same or another authors must be included. The body of the manuscript also must include the theoretical aspects of the research, as well as experimental or simulation results if any, together with a Conclusions Section.

References

A numbered list of references must be provided at the end of the paper. The list should be arranged in the order of citation in text, not in alphabetical order. List only one reference per reference number. It is not necessary to mention the authors of a reference unless such mention is relevant to the text (see *IEEE Editorial Style Manual*). Sample correct formats for various types of references are as follows.

Periodicals:

[1] F. N. Author, "Name of paper," *Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, abbrev. Month, year. [Online]. Available: URL. Accessed on: Month Day, year.

Example:

[1] L. H. Hernández-Gómez, I. Sauceda-Meza, G. Urriolagoitia-Calderón, A. Balankin, and O. Susarrey, "Evaluation of crack initiation angle under mixed mode loading at diverse strain rates," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 42, no. 1, pp. 53-61, Sep. 2004. [Online]. Available: http://www.mfractal.esimez.ipn.mx/integrantes/balankin/balankin_publications/public02/2004_3.pdf. Accessed on: May 25 , 2012.

Book:

[2] F. N. Author, *Title of Published Book*, xth ed. City of Publisher: Abbrev. of Publisher, year. [Online]. Available: URL. Accessed on: Month Day, year.

Example:

[2] L. Jayamaha, *Energy-Efficient Industrial Systems: Evaluation and Implementation* , 1st ed., Portland: McGraw-Hill Education, 2014.

Theses and Dissertations:

[3] F. N. Author, "Title of thesis/dissertation," M. S. thesis or Ph. D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., year. [Online]. Available: URL. Accessed on: Month Day, year.

Example:

[3] L. H. Hernández-Gómez, "Crack Initiation under Shock Loading: Validation of a New Testing Technique," Ph. D. dissertation, Dep. Mech. Ing., Oxford Univ., Oxford, UK, 1992.

Published Conference Proceedings:

[4] F. N. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, City of Conf., Country, year, pp. xxx-xxx [Online]. Available: URL. Accessed on: Month Day, year.

Example:

[4] S. Agrawal, P. Chaporkar, and R. Udwani, "Call admission control for real-time applications in wireless network," in *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*, Turin, Italy, 14-19 Apr., 2013. [Online]. Available: doi, 10.1109/INFCOM.2013.6566789. Accessed on: Nov. 28, 2014.

Preparation for publication

The following is a list of general guidelines for the submission of electronic media by prospective authors:

The operating system and word processing software used to produce your document should be noted on your e-mail (postscript and Adobe Acrobat PDF files are not acceptable because the files cannot be edited).

Text in 'Times New Roman' at 10, single spacing without paragraph indent;check that your files are complete. Include: abstract, index terms, text, references and figure captions.

Figures comments must be below them and tables comments above. It is necessary to use the International Systems of Units not abbreviations.

In order to achieve the highest quality of reproduction, resolutions of 600 dpi (1 bit/sample) at final printed size for line art (graphs, charts or drawing) and 300 dpi (8 bits/sample) at final printed size for photographs and other grayscale images are required.

Científica assumes that material submitted to its publication is properly available for general dissemination for the readership of this publication. It is the responsibility of the authors, not *Científica*, to determine whether disclosure of their material requires the prior consent of other parties and, if so, to obtain that consent. If an author uses charts, photographs, or other graphics from previously printed material, he/she is responsible for obtaining written permission from the publisher to use the material in his/her manuscript.

Científica does not provide drafting or art services. Thus, the better the quality of the material submitted, the better the published result. Try to adhere to the accepted style as much as possible. Of particular importance here is the references list, editing references guidelines are from the *IEEE Editorial Style Manual* (Chapter V. Editing References, pp.34-40).

Científica
ISSN 1665-0654 | eISSN en trámite
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica,
Instituto Politécnico Nacional, México.

www.cientifica.esimez.ipn.mx
revistacientifipn@yahoo.com.mx.

Instituto Politécnico Nacional, México
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Científica

ISSN 1665-0654
eISSN en trámite

volumen 21, número 1, enero-junio 2017

Comité Editorial

Guillermo Urriolagoitia Calderón
Instituto Politécnico Nacional
MÉXICO

Alexander Balankin
Instituto Politécnico Nacional
MÉXICO

Jesús del Castillo
Instituto Venezolano de Investigación Científica
VENEZUELA

María Teresa Alonso Rasgado
University of Manchester
REINO UNIDO

Manuel Elices Calafat
Universidad Politécnica de Madrid
ESPAÑA

Marco Ceccarelli
University of Cassino
ITALIA

Héctor Pérez Meana
Instituto Politécnico Nacional
MÉXICO

Jinhui Shao
University of Shuo
JAPÓN

Indizada en:
Latindex: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.
www.latindex.org
Periódica: Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias.
www.dgbiblio.unam.mx
Redalyc: Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.
www.redalyc.org
Publindex: Índice Bibliográfico Nacional Revistas Científicas Homologadas del Colciencias.
http://scienti.colciencias.gov.co:8084/publindex/

Contenido

Biomodelado de los componentes del oído medio humano haciendo uso de imágenes de resonancia magnética
Biomodeling of Components of the Human Middle Ear Using Magnetic Resonance Imaging
Adolfo **López-Liévano**, Daniel Ramón **López-Liévano**, Hernando Efraín **Caicedo-Ortiz**, Alejandro **González-Rebattú**, Mauricio **González-Rebattú** | **México - Colombia** 3-8

Estimación del desgaste volumétrico de componentes tribológicos lubricados, mediante la aplicación combinada de modelos de cuantificación de partículas de desgaste
Volumetric Wear Estimation of Lubricated Tribological Components by Means of Combining Analytical Models for Wear Prediction
Yamile **Lara** | **Venezuela** 9-16

Generalidades de estrategias de control en aerogeneradores de transmisión directa
Issues on Control of Direct-Drive Wind Turbine Generator
Luz Yazmín **Villagrán-Villegas**, Isaura Victoria **Hernández-Rodríguez**, Juan Carlos **Anzelmetti-Zaragoza**, Alejandro **Marquina-Chávez**, Celia María **Calderón-Ramón**
México 17-24

mHealth indispensable para la salud de los mexicanos
mHealth Essential for the Health of Mexicans
José Rodrigo **Espinoza-Bautista**, Salvador **Álvarez-Ballesteros**, Mario **Romero-Castro** | **México** 25-34

Análisis de envejecimiento de los pernos de cierre de la tapa de una vasija de un reactor nuclear tipo BWR
Aging Analysis of the Stud Bolts of the Closure Head of a BWR Nuclear Reactor Vessel
Gilberto **Soto-Mendoza**, Juan **Cruz-Castro**, Alejandra **Armenta-Molina**, Luis Héctor **Hernández-Gómez**, Pablo **Ruiz-López,** Noel **Moreno-Cuahquentzi**, Alejandro **Luna-Áviles** | **México** 35-41

Do Intergalactic Photons Attract or Repel Each Other?
¿Los fotones intergalácticos se atraen o se repelen?
Héctor **Torres-Silva**, Altair **Souza-de-Assis** | **Chile - Brasil** 43-48

Construction of a Homogeneous Magnetic Field for Orthopedic Applications
Construcción de un campo magnético homogéneo para aplicaciones ortopédicas
Pedro A. **Lomelí-Mejía**, Alfredo **Tejeda-Buenosaires**, José **Alanís-Carbajal** | **México** 49-54

Aplicación de la teoría del costo exergético para el análisis de un sistema de refrigeración con subenfriamiento por un enfriador termoeléctrico
Application of Exergetic Cost Theory to Analyze a Refrigeration System with Subcooling by a Thermoelectric Cooler
Ignacio **Carvajal-Mariscal**, Pedro **Quinto-Diez**, José Eduardo **Flores-Ortega**, Román **Bravo-Cadena**, César Augusto **Real-Ramírez**, Eliseo **Martínez-Espinosa** | **México** 55-62

Equipo Editorial
Guillermo Urriolagoitia Calderón, **Director** · Alma Vicenta Miranda Godínez, **Coordinadora Editorial**
Cuauhtémoc Jiménez Pérez, **Editor Técnico** · Luis Alberto Méndez Cruz, **Página Web**