

RESERVA DE DERECHOS AL USO EXCLUSIVO DE TÍTULO No. 04-2018-070614032000-203
VIGENCIA 30/05/2018 a 30/05/2019
ACTUALIZACIÓN: 01/01/2019
ISSN 2594-1925
a cargo de ECITEC



RECIT

REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS

VOLUMEN 2 CAPÍTULO 1

Impacto del Diseño para Cambios Rápidos (DFC) en la Manufactura Moderna

Síntesis y Caracterización De $Ni_{1-x}Cu_{2x}$ Cristalino

Estudio DFT a Moléculas Derivadas de Benzimidazol y Piridina con Capacidad Inhibidora de Corrosión

Diabetic Foot Ulcers Treatment with Silver Nanoparticles

Construcción de una Bobina de Tesla de Estado Sólido

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico para Robot Humanoide que Permita Emular el Movimiento del Cuello de los Seres Humanos.

Evaluation of Cobalt Nanoparticle Deposited Graphene Oxide and Carbon Nanotube Supports as Supercapacitor Electrodes

Dimensionality and Geometry Effects on a Quantum Carnot Engine Efficiency



ECITEC

2019

Enero- Marzo

VOL. 2, NÚM. 1 (2019)

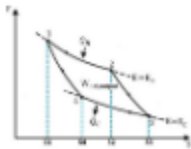
TABLA DE CONTENIDOS

ESTUDIO DE CASOS



Impacto del diseño para cambios rápidos (DFC) en la manufactura moderna
 Yuridia Vega, Roberto Romero López, Marco Antonio Juárez Mendoza

PDF
 1-7



Efectos de dimensionalidad y geometría en la eficiencia del motor quantum carnot
 Hiram Kalid Herrera Alcantar, José Carlos Carvajal García, Osvaldo Rosales Pérez,
 Rubén Cesar Villarreal-Sánchez, Priscilla Elizabeth Iglesias-Vázquez

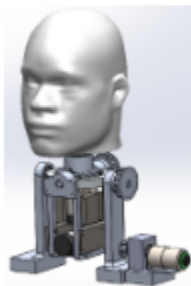
PDF (ENGLISH)
 45-48

NOTA TÉCNICA



Construcción de una bobina de Tesla de estado sólido
 Sergio Orendain Castro, Alberto Hernández Maldonado, Eduardo Murillo
 Bracamontes

PDF
 26-34

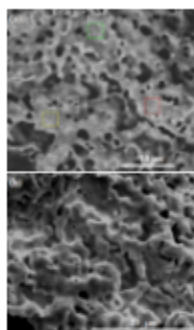


Desarrollo de un sistema mecatrónico para robot humanoide que permita emular el movimiento del cuello de los seres humanos
 Francisco José López Cortés, Sergio Vergara Limón, María Aurora Diozcora Vargas
 Treviño, Amparo Dora Palomino Merina, David Eduardo Pinto Avedaño, Darnes
 Vilarriño Ayala

PDF
 35-39

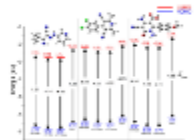


ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN



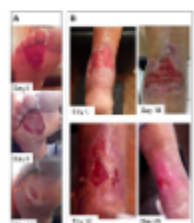
Síntesis y caracterización de Ni_{0.76}Cu_{0.24} cristalino
Luis Antonio Flores Sánchez, Juan Manuel Quintana Melgoza

PDF
8-13



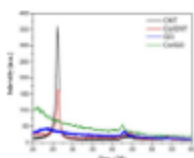
Estudio DFT a moléculas derivadas de benzimidazol y piridina con capacidad inhibidora de corrosión
Jorge Reyes-Corrales, Rody Soto-Rojo, Daniel Glossman-Miknit, Jesús Baldenebro-López

PDF
14-19



Tratamiento de las úlceras del pie diabético con nanopartículas de plata
Cesar Alejandro Almonaci Hernández, Isis Marion Cabrera Torres, Rosangela López-Acevedo, Karla Oyuki Juárez-Moreno, Martín E. Castañeda-Juárez, Horacio Almanza-Reyes, Alexey Pestryakov, Nina Bogdanchikova

PDF (ENGLISH)
20-25



Evaluación del óxido de grafeno depositado en nanopartículas de cobalto y soportes de nanotubos de carbono como electrodos supercondensadores
David Ricardo Aguilar-Meza, Moisés Israel Salazar-Gastélum, Sergio Pérez-Sicairos, Rosa María Félix-Navarro, Yadira Gochi-Ponce

PDF (ENGLISH)
40-44



Impacto del diseño para cambios rápidos (DFC) en la manufactura moderna

Design impact for rapid change (DFC) on modern manufacturing

Vega Yuridia^{1,2}, Romero López Roberto², Juárez Mendoza Marco Antonio¹

¹Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Universitario 1000. Unidad Valle de las Palmas, C.P. 21500. Tijuana, Baja California, México

²Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

Autor de correspondencia: Yuridia Vega, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Universitario 1000. Unidad Valle de las Palmas, C.P. 21500. Tijuana, Baja California. Correo electrónico: vegay@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0001-5229-9655.

Recibido: 14 de Febrero del 2018 **Aceptado:** 15 de Agosto del 2018 **Publicado:** 03 de Enero del 2019

Resumen. - *El avance de las tecnologías en la industria de la manufactura, así como la necesidad de contar con procesos más rápidos y eficientes que brinden un mejor desempeño en la calidad, mejores tiempos de respuesta, flexibilidad y rentabilidad, es un tema importante en la manufactura de clase mundial. Estos indicadores son claves para que una empresa pueda mantenerse en la competitividad de los mercados, que exige una alta diversidad en productos y de volúmenes de producción. En este sentido, uno de los factores claves que contribuye a que un proceso sea más rápido y eficiente, son los tiempos de preparación o de cambio que se dan entre un producto y otro en el proceso de fabricación; aunque existen herramientas de Lean Manufacturing enfocadas a acortar estos tiempos, se ha demostrado que, con el uso de la metodología "Design for Changeover" (DFC), la cual considera estos cambios desde el diseño del equipo, se pueden abatir en gran medida los tiempos de cambio e impactar de manera positiva la flexibilidad y fabricación de lotes pequeños. En este trabajo, se analiza la literatura existente del DFC y el impacto que ha tenido, así como los factores que han intervenido, al fin de aportar un marco de referencia a las industrias interesadas en acortar los tiempos de cambio en sus procesos productivos*

Palabras clave: Diseño para cambios; DFC; Manufactura Flexible; Cambios Rápidos; Cambio de Modelo, Diseño de Equipo.

Abstract. - *The progress of technologies in the manufacturing industry and the need for faster and more efficient processes that provide better quality performance, better response times, flexibility and cost-effectiveness is an important issue in world-class manufacturing. These indicators are key issues for a company to remain competitive in the markets, which requires a high diversity in products and production volumes. In this sense, one of the key factors that contribute to a faster and more efficient process, are the times of preparation or change that occur between one product and another in the manufacturing process. Although there are Lean Manufacturing tools aimed at shortening these times, it has been demonstrated that, with the use of the "Design for Changeover" (DFC) methodology, which considers these changes from the design of the equipment, times of change can be reduced and increase positively impact the flexibility and manufacturing of small lots. In this paper, we analyze the existing literature of the DFC and show the impact that has had, as well as the factors that have intervened, in order to provide a frame of reference to the industries interested in shortening their times of change in their production processes.*

Keywords: Design for Changeover; DFC; Manufacturing Flexibility; Rapid Changeover, Changeover; Equipment Design.



1. Introducción

En los últimos años las industrias se han preocupado por abastecer las necesidades de bienes y servicios del mercado que les permitan posicionarse como empresas competitivas y globalizadas [1]. Esto implica ofrecer una alta calidad, así como precios competitivos en los productos ofertados, siendo en muchas ocasiones, las demandas de los clientes de bajo volumen de producción, alta variedad de productos y tiempos de entrega cortos [2], por lo que ha sido necesario utilizar internamente estrategias de manufactura que permitan hacer mejor uso de los recursos, tener mayor flexibilidad en sus procesos productivos y enfocarse en proyectos de mejora, que impacten en la reducción de costos de fabricación [3]. En este sentido, las organizaciones han aumentado sus esfuerzos por mejorar la eficiencia de los equipos de producción para responder a estas necesidades [4]. Cousens [5], menciona que, si los tiempos de cambios son más cortos, mayor será la flexibilidad de producción haciendo más fácil el cumplimiento de las necesidades de los clientes; por lo tanto, un cambio de modelo (*Changeover*) eficiente permite aumentar la flexibilidad de producción, beneficiando la fabricación de lotes pequeños y variación de productos [6,7].

1. Metodología

Se analiza la definición e importancia de los cambios de modelo (*Changeover*) en los procesos de fabricación y los factores y beneficios que tiene la metodología de diseño para cambios de modelo (*Design for Changeover, DFC*), en las industrias modernas para acortar los tiempos de cambios.

1.1 Cambio de modelo

En un proceso productivo se identifican dos tipos de tiempos: uno es el tiempo que se tarda la fabricación de un producto (tiempo productivo de la máquina) y, el segundo, es el tiempo en que la máquina se encuentra parada por descansos de producción, averías o por cambio de modelo, los cuales no le añaden valor al producto y entre más largos sean más costoso son para la empresa [8]; en su trabajo Chabowski presenta un análisis de Pareto de las principales causas por las cuales una línea de producción no está disponible, resultando con un 37 % que son debido a cambios de productos [9]. Pero, ¿qué es un cambio de modelo en un proceso de fabricación?, Reik (2006), lo define como el “*Conjunto de actividades necesarias para establecer y/o ajustar ciertos elementos correctamente al equipo de fabricación, con el fin de producir un nuevo producto en la calidad y velocidad de salida deseada*” [10].

En la figura 1, se explica el proceso de cambios de modelo menciona que inicia cuando se termina la fabricación del producto A y la tasa de producción desciende hasta el nivel cero, una vez los equipos se han detenido por completo se desarrolla el periodo de ajuste (*set-up*), periodo en el cual se instalan todos los accesorios y aditamentos requeridos para fabricar el producto B, después cuando están listos todos los ajustes se da inicio al periodo de arranque (*run-up*), el cual se prolonga hasta que las tasas de velocidad y calidad son alcanzadas nuevamente [11-13]. Las pérdidas de producción ocasionadas durante el periodo de ajuste (*set-up*) y el periodo de arranque (*run-up*), impactan en la tasa de producción y la calidad de los productos [14].

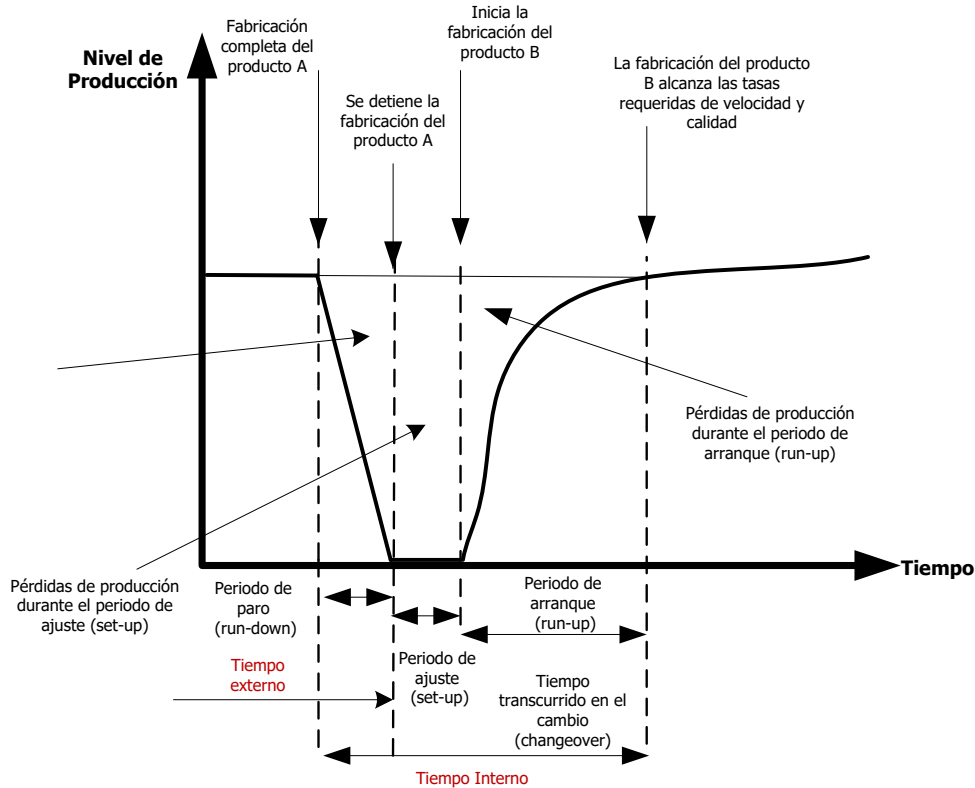


Figura 1. Componentes de un cambio de modelo [17].

Por lo anterior, los cambios rápidos son un importante componente de la manufactura moderna [15, 16], pudiendo reducir los tiempos por medio de dos formas: una mediante el despliegue de estrategias de mejora continua en el sistema existente y la segunda mediante el diseño e implementación de nuevos sistemas [17], el segundo obteniéndose mediante la metodología de diseño para el cambio “*Design for Changeover*”(DFC).

2.2 Diseño para el cambio (DFC)

DFC es una metodología genérica para diseñar equipo de fabricación flexible y sensible, que proporciona una guía para los fabricantes de equipos originales (“*Original Equipment Manufacturer*”, OEM), con el fin de mejorar la capacidad de cambio desde la etapa de diseño [18], reduciendo el esfuerzo físico, los ajustes, y la

variabilidad de los cambios [17]. Fue desarrollada por profesores de la Universidad de Bath en Inglaterra [19].

Existen trabajos que demuestran que cuando las mejoras se realizan desde la etapa de diseño son más fáciles de sostener debido a la práctica que genera en los operadores y porque simplifica los procedimientos de las actividades de cambio. La aplicación del DFC, impacta en el diseño del producto, de maquinaria, herramientas y en los sistemas de producción [17], lo que permite ser más flexibles a las necesidades del mercado.

En la figura 2, de Hicks (2010), analiza la calidad, eficiencia y flexibilidad como factores importantes para la capacidad de fabricación y que están fuertemente interrelacionadas en el sistema, también muestra la influencia de las personas, prácticas, productos y procesos, así



como las metodologías y herramientas para logran con éxito los resultados de la organización [20], mostrando el DFC como una herramienta importante para los cambios rápidos.

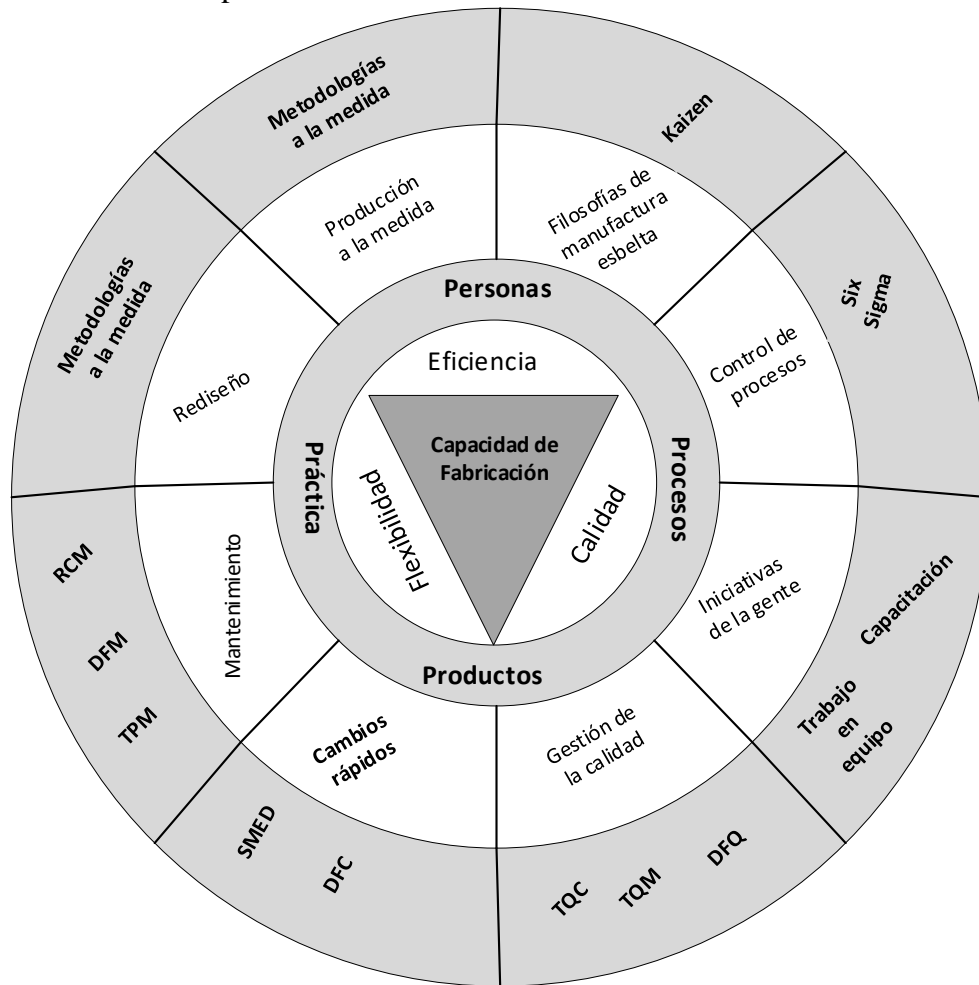


Figura 2. Capacidad de fabricación, métodos y herramientas [20].

2. Resultados

En la tabla 1, se muestran los principales trabajos que aportan reglas y procedimientos para apoyar a los diseñadores a diseñar equipos y/o procesos de fabricación con un enfoque a la reducción del tiempo de cambio y, a su vez, apoyar a la flexibilidad y variación de producción.

Vemos que existen trabajos que proporcionan una guía para los diseñadores de equipos que facilitan la capacidad de cambio, pero aun hacen falta metodologías más claras y específicas [19, 23, 25, 29], con evidencias del impacto que tiene su aplicación en los procesos de fabricación. Entre los principales factores que mencionan en sus trabajos los autores de la tabla 2, podemos conjugarlos en factores técnicos y factores organizacionales.



Tabla 1. Principales aportaciones para la metodología de diseño de equipo (DFC).

| AUTOR | APORTACIÓN |
|-----------------------------|--|
| Mcintosh [14] | Se muestran las ventajas del diseño en las actividades de mejora continua, aseguran que cuando las mejoras se basan en el diseño se vuelven más sostenibles para las empresas. |
| Mileham [17] | Se establecen reglas para el cambio desde la etapa de diseño, aplicables en el diseño de nuevos equipos o mejora continua de los existentes. |
| McIntosh [21] | Se discuten los roles y ejemplo para mejora de los cambios, así como el rendimiento de mantenimiento. |
| Van Goubergen [4] | Se adaptaron las reglas de diseño propuestas por Mileham, se suman cuestiones organizacionales, del personal y procedimientos. |
| Mileham [22] | Presenta reglas de diseño y las diferencias con los fabricantes de equipos originales (OEMs) y profesionales de mejoras retrospectivas. |
| Reik [23] | Conceptos básicos para una metodología formal de DFC, oportunidades de mejora en un marco de personas, prácticas, procesos y productos. |
| Reik [18] | Aporta una metodología de 9 pasos para los diseñadores de equipo, al fin de desarrollar procesos más flexibles y sensibles al cambio desde la etapa de diseño. |
| Reik, [19] | Se muestran los beneficios de integrar en conjunto el diseño del producto y del proceso de fabricación. |
| Hicks [24] | En su trabajo analiza las limitaciones y éxito que tienen las herramientas de mejora de sistemas de fabricación, clasificando al DFC, como una herramienta de calidad de diseño y de diseño de herramientas y cambios. |
| Owen [25] | Muestra un esquema sistemático de la metodología DFC, se emplean índices de 0-100 para dirigir los esfuerzos del diseño. |
| Schreuder [26] | Analiza los factores que impactan en los tiempos de cambios y la flexibilidad de una línea de envasado de cerveza, clasificándolos en factores de producción, de planeación y de herramientas de manufactura. |
| Thomas G [27] | Analiza los métodos que favorecen a la Reconfiguración de Sistemas de Montaje (RAS), menciona que el DFC es una herramienta eficaz para la flexibilidad y arquitectura del sistema. Una de las desventajas es que el método debe ser aplicado con otras herramientas de mejora. |
| Pathak [28] | Desarrolla un conjunto de requerimientos para la mejora sostenible en los procesos, destacando para el DFC; contar con una perspectiva funcional, comprensión de la metodología, las reglas del diseño, identificar los factores del proceso y si es posible contar con la eficacia del mismo. |
| G. Götz [29] | Establece los conceptos de diseño para el incremento del formato y flexibilidad en los productos y procesos. |

Tabla 2. Factores organizacionales y técnicos a considerar en el diseño de equipo.

| ORGANIZACIONALES | TÉCNICAS |
|---|---|
| *Variedad de productos ofrecidos al mercado. | *Automatización de equipo. |
| *Liderazgo y compromiso. | *Incluir el uso de dispositivos automáticos y de activación remota. |
| *Objetivos de la compañía. | *Mantenimiento del equipo. |
| *Indicadores de desempeño (operativos y organizaciones). | *Uso de materiales y ligeros. |
| *Costo/beneficio del diseño. | *Reducir el número de máquinas. |
| *Impacto de la mejora. | *Eliminar piezas completas. |
| *Equipo consultor de diseño. | *Conexiones de liberación rápida. |
| *Diseño y cultura organizacional. | *Reducir el uso de herramientas manuales. |
| *Motivación del personal. | *Eliminar la necesidad de utilizar herramientas. |
| *Tiempo y esfuerzo para lograr la mejora. | *Estandarizar las características de las piezas de cambio. |
| *Control de cambios de ingeniería. | *Estandarizar los elementos de unión. |
| *Disminuir y alternar tareas. | *Errajes. |
| *Aspirar a la ejecución de una sola persona a las tareas. | * Motores eléctricos. |
| *Instrucciones claras. | *Predicción de las piezas. |
| *Personal capacitado. | *Equipo de monitoreo. |
| *Flexibilidad de los operadores. | *Equipos tolerantes a la variación. |
| | * Sistemas a prueba y error. |
| | *Eliminación de la necesidad de ajuste. |
| | *Mejorar el acceso a las piezas de cambio. |



Algunos beneficios que ha traído la implementación de la metodología DFC en la industria se mencionan a continuación: Mileham (1999) presenta una reducción del tiempo de cambio en un 50 % y un aumento de 500 K euros al año [17]. Owen (2011) logró una reducción del tiempo de cambio de más de 25 min a menos de 5 min, con un retorno de la inversión en aproximadamente 7 meses [25]. Chabowski (2016) con una modificación en el diseño, logró acortar los tiempos de cambios de una línea de producción en un 40 %, el ciclo de producción en un 32 % y un aumento en la disponibilidad de la línea de 84.81 % a 86.06 % [9]. Como se puede apreciar, las empresas están preocupadas por sus procesos productivos, ya que se requieren de sistemas de fabricación flexibles que les permiten adaptarse rápidamente a los cambios y necesidades variadas del mercado, por ello, hacen un esfuerzo por mejorar la eficiencia de los procesos de producción para responder a estas necesidades [4]. Por lo tanto, un cambio de modelo (Changeover) eficiente permite aumentar la flexibilidad de producción, beneficiando la fabricación de lotes pequeños y variación de productos con la calidad requerida [7]. Esto se logra a través de la implementación y seguimiento de metodologías de manufactura [24].

3. Conclusiones

Después de la revisión de la literatura existente en relación a la metodología “*Design for Changeover*” -DFC-, los autores coinciden en la necesidad de contar con metodologías enfocadas al diseño de equipos flexibles y adaptados a cambios continuos del sector industrial, al brindar herramientas a los diseñadores sobre las necesidades e importancia de diseñar tomando en cuenta la reducción del tiempo de cambio, que contribuyan en los objetivos primordiales de la fabricación moderna, que es la fabricación de lotes pequeños y la reducción de costos asociados a los cambios de modelo, en un siguiente trabajo se pretende ampliar las variables y los factores que intervienen en los cambios rápidos.

Referencias

- [1] S. Shinde, S. Jahagirdar, S. Sane, and V. Karandikar, "Set-up time Reduction of a Manufacturing Line using SMED Technique," *Int. J. Adv. Ind. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 50-53, 2016. <https://www.irjet.net/archives/V3/i7/IRJET-V3I7331.pdf>
- [2] A. Azizi and T. a/p Manoharan, "Designing a Future Value Stream Mapping to Reduce Lead Time Using SMED-A Case Study," *Procedia Manuf.*, vol. 2, pp. 153-158, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.027>
- [3] E. S. M. da Costa, R. M. Sousa, S. Bragança, and A. C. Alves, "An industrial application of the SMED methodology and other lean production tools," *4th Int. Conf. Integrity, Reliab. Fail. Mech. Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, 2013. <https://paginas.fe.up.pt/clme/IRF2013/>
- [4] D. Van Goubergen and H. Van Landeghem, "Rules for integrating fast changeover capabilities into new equipment design," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 18, no. 3, pp. 205-214, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(02\)00011-X](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(02)00011-X)
- [5] A. Cousens, M. Szwajczewski, and M. Sweeney, "A process for managing manufacturing flexibility," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 29, no. 4, 2009. <https://doi.org/10.1108/01443570910945828>
- [6] K. Ulrich, "The role of product architecture in the manufacturing firm," *Res. Policy*, vol. 24, no. 3, pp. 419-440, 1995. [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(94\)00775-3](https://doi.org/10.1016/0048-7333(94)00775-3)
- [7] A. Cousens, M. Szwajczewski, and M. Sweeney, "A process for managing manufacturing flexibility," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 29, no. 4, pp. 357-385, 2009. <https://doi.org/10.1108/01443570910945828>
- [8] F. E. Carbonell, "Técnica smed. reducción del tiempo de preparación," *3 Ciencias*, pp. 1-11, 2013. <http://lean.ediconsultoria.es/tecnica-smed-reduccion-del-tiempo-de-preparacion/>
- [9] P. Chabowski, P. Rewers, and J. Trojanowska, "Impact of shortening changeover times on manufacturing flexibility," *Technological Forum*, pp. 1-7, 2016. <https://www.tmr.qld.gov.au/About-us/Events/Engineering-Technology-Forum-2016.aspx>
- [10] M. P. Reik, R. I. Mcintosh, S. J. Culley, A. R. Mileham, and G. W. Owen, "A formal design for changeover methodology. Part 1: theory and background," 2006. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM527>
- [11] A. C. Phan, A. B. Abdallah, and Y. Matsui, "Quality management practices and competitive performance: Empirical evidence from Japanese manufacturing companies," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 133, no. 2, pp. 518-529, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.01.024>
- [12] J. P. Pinto, *Lean Thinking - Introdução ao pensamento magro*, *Comunidade Lean Think.*, pp. 159-163, 2008.



<https://vdocuments.site/joao-pinto-introducao-ao-lean-thinking.html>

[13] P. T. Preenen, R. Vergeer, K. Kraan, and S. Dhondt, "Labour productivity and innovation performance: The importance of internal labour flexibility practices," *Econ. Ind. Democr.*, p. 0143831X15572836-, 2015.

<https://doi.org/10.1177/0143831X15572836>

[14] R. Mcintosh, S. Culley, G. Gest, T. Mileham, and G. Owen, "An assessment of the role of design in the improvement of changeover performance," vol. 16, no. 9, pp. 5-22, 1996.

<https://doi.org/10.1108/01443579610125552>

[15] M. Sugai and V. Omizolo, "Proposta de um modelo para classificação da fase pós setup conforme características do período de aceleração," 1992. <http://docplayer.com.br/52448140-Proposta-de-um-modelo-para-classificacao-da-fase-pos-setup-conforme-caracteristicas-do-periodo-de-aceleracao.html>

[16] S. Patel, B. G. Dale, and P. Shaw, "Set-up time reduction and mistake proofing methods: an examination in precision component manufacturing," *TQM Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 175-179, 2001.

<https://doi.org/10.1108/09544780110385528>

[17] R. I. Mileham, A.R., Culley, G.W., Owen, G.W., and McIntosh, "Rapid changeover - a pre-requisite for responsive manufacture," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 19, no. 8, pp. 785-96, 1999.

<https://doi.org/10.1108/01443579910274383>

[18] M. P. Reik, R. I. McIntosh, S. J. Culley, A. R. Mileham, and G. W. Owen, "A formal design for changeover methodology. Part 2: theory and background," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 220, no. 8, pp. 1225-1235, 2006.

<https://doi.org/10.1243/09544054JEM527>

[19] M. Reik, G. Owen, S. Cully, R. McIntosh, and T. Mileham, "Integrating product and manufacturing systems design to minimize changeover losses," *Iced 07*, no. August, pp. 1-9, 2007. <https://www.designsociety.org/publication/25445/Integrating+Product+and+Manufacturing+System+Design+to+Minimise+Changeover+Losses>

[20] B. J. Hicks and J. Matthews, "The barriers to realising sustainable process improvement: A root cause analysis of paradigms for manufacturing systems improvement," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 23, no. 7, pp. 585-602, 2010.

<https://doi.org/10.1080/0951192X.2010.485754>

[21] R. I. McIntosh, S. J. Culley, A. R. Mileham, and G. W. Owen, "Changeover improvement: A maintenance perspective," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 73, no. 2, pp. 153-163, 2001.

[https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(00\)00170-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00170-5)

[22] G. W. Mileham, A. R., Culley, S. J., McIntosh, R. I. and Owen, "The development of a design for changeover methodology," in In: *International Forum on DFMA*, 2002-01-01, 2002.

<https://es.scribd.com/document/459175888/Tomo-23-Diseminacion-de-la-investigacion-en-la-educacion-superior-Celava-2019-pdf>

[23] M. Reik, R. McIntosh, G. Owen, A. R. Mileham, and S. Culley, "Design for Changeover (DFC)," *Mass Cust. Challenges Solut.*, pp. 111-136, 2006.

https://doi.org/10.1007/0-387-32224-8_6

[24] B. J. Hicks and J. Matthews, "The barriers to realising sustainable process improvement: A root cause analysis of paradigms for manufacturing systems improvement.," *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 23, no. 7, pp. 585-602, 2010.

<https://doi.org/10.1080/0951192X.2010.485754>

[25] G. W. Owen, J. Matthews, R. I. McIntosh, and S. J. Culley, "Design for Changeover (DFC): enabling flexible and highly responsive manufacturing," pp. 247-273, 2011.

https://doi.org/10.1007/978-1-84996-489-0_12

[26] N. W. Schreuder, "Maximizing flexibility through minimizing changeover time," no. June, 2014.

https://essay.utwente.nl/65172/1/Schreuder_MA_MB.pdf

[27] S. R. Thomas G. Jefferson, Panorios Bernardos, "Reconfigurable Assembly System Design Methodology: A Wing Assembly Case Study," p. 18, 2015.

<https://www.jstor.org/stable/26268801>

[28] S. S. Pathak, "The barriers to realising sustainable process improvement: A root cause analysis of paradigms for manufacturing systems improvement," vol. 1, no. 1, pp. 215-227, 2015.

<https://es.scribd.com/document/393859118/78-pdf>

[29] G. Reinhart, G. Götz, P. Stich, J. Backhaus, "Design Approach for the Development of Format-Flexible Packaging Machines," vol. 10, no. 1, pp. 108-117, 2016.

<http://doi.org/10.5281/zenodo.1338736>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



Síntesis y caracterización De $Ni_{0.76}Cu_{0.24}$ cristalino

Synthesis and characterization of crystalline $Ni_{0.76}Cu_{0.24}$

Flores Sánchez Luis Antonio , Quintana Melgoza Juan Manuel 

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Calzada Universidad 14418. Parque Industrial Internacional Tijuana, C.P. 22390. Tijuana, Baja California, México

Autor de correspondencia: Luis Antonio Flores Sánchez, Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Calzada Universidad 14418 Parque Industrial Internacional Tijuana, Baja California, México, C.P. 22390. E-mail: lflores94@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0002-6276-8408

Recibido: 20 de Marzo del 2018 **Aceptado:** 30 de Noviembre del 2018 **Publicado:** 10 de Enero del 2019

Resumen. - *En este trabajo se propone la síntesis de una aleación de níquel-cobre por descomposición térmica en atmósfera reductora a partir de la mezcla estequiometríca 3:1 de sales de Ni y Cu. La metodología utilizada es de bajo costo, sencilla, amigable con el medio ambiente y permite obtener una fase cristalina libre de contaminantes o remanentes de reacción con un tamaño de cristal de 33 nm y tamaño de partícula de $659 \pm 123 \times 416 \pm 102$ nm, con morfología semiesférica y aglomerados heterogéneos. Adicionalmente al realizar un análisis comparativo de los parámetros de red experimental, teóricos reportados y calculados con la ley de Vegard, sugiere que el material sintetizado presenta una fracción diferente de Cu con respecto a la identificada por la base de datos $Ni_{0.76}Cu_{0.24}$, sin embargo, en el parámetro de red no se observa un cambio significativo ($\approx 0.1\%$). El material se caracterizó por difracción de rayos-X (XRD), espectroscopía por dispersión de energía (EDS) y microscopía electrónica de barrido (SEM), el tamaño de cristal se calculó con la ecuación de Scherrer y la fracción de Cu en la aleación con aplicando la ley de Vegard.*

Palabras clave: Síntesis; Descomposición Térmica Reductora; Caracterización; Aleación; Níquel-Cobre.

Abstract. - *In this work, we synthesized the alloy of nickel-copper by thermal treatment in reductive-flow of hydrated salts based on Ni and Cu used the stoichiometric 3:1 respectively. The methodology proposed is low-cost, simple, friendly to environment, and obtain a crystalline phase free of contaminants or remnants of reaction with crystal size of 33 nm and particle size of $659 \pm 123 \times 416 \pm 102$ nm, the particles exhibit like-spherical morphology and heterogeneous agglomerates. In addition, we compared the experimental lattice parameters by theoretical reported and calculated by Vegard's law. The results by Vegard's law suggest that the composition of copper (XCu) in the alloy is different with respect to the phase identified $Ni_{0.76}Cu_{0.24}$ by XRD database, but this result don't affect the lattice parameter. The material was characterized by X-ray diffraction (XRD), energy dispersive spectroscopy (EDS), scanning electron microscopy (SEM), and crystal size and copper fraction in alloy was estimated using the Scherrer equation, and Vegard's law respectively.*

Keywords: Synthesis; Reductive Thermal Decomposition; Characterization; Alloy; Nickel-Copper.



1. Introducción

El estudio de materiales a base de metales de transición de bajo costo como Ni–Cu, es de interés en diversos campos como: catálisis, electroquímica, síntesis y control de emisiones, debido a las aplicaciones que presentan estos materiales en la producción de H₂ vía: catalítica, electrolisis y reformación [1–4], o en el control de emisiones de NO_x y CO [5–6], producción de combustibles a partir de CO₂ [7] o sensores de compuestos tóxicos [8]. Por lo anterior, se han reportado metodologías de síntesis como calcinación, molienda, combustión, coprecipitación, impregnación húmeda, método de fusión y electrodeposición [2–3]. A pesar de esto algunas metodologías no reportan una fase específica de Ni–Cu o se asume la identificación de la misma en función de la ley de Vegard [9]. Por lo cual en este trabajo se propone la síntesis y caracterización de una fase de Ni-Cu, en la que se calculara la X_{Cu} y comparar con lo reportado en la bibliografía para determinar la composición de la fase sintetizada por descomposición térmica.

1. Materiales y métodos

1.1 Síntesis de materiales

La aleación de Ni–Cu se sintetizó por descomposición térmica a 600 °C durante 1 hora de reacción en atmósfera reductora, a partir de la mezcla estequiométrica 3:1 de Ni(NO₃)₂·6H₂O (Aldrich 244074) y Cu(NO₃)₂·2.5H₂O (Aldrich 223395) respectivamente, la descomposición se realizó dentro tubo de cuarzo en posición horizontal sobre un horno eléctrico marca Lindberg Blue.

1.2 Caracterización de materiales

La identificación de las fases cristalinas se realizó utilizando un XRD BRUKER D8 ADVANCE con radiación Cu_{Kα} (40 kV, 30 mA), para la identificación la fase cristalina se utilizó la base de datos JCPDS-ICCD [10]. El tamaño de cristal (TC) se calculó con la ecuación de Scherrer usando el pico (111) [11], los patrones de difracción teóricos se simularon el software PowderCell for Windows [12]. El parámetro

de red (a) de la fase sintetizada se obtuvo del pico (200), la fracción de cobre (X_{Cu}) en la aleación se determinó de acuerdo a la ley de Vegard con la siguiente relación:

$$X_{Cu} = \frac{a_{100} - a_{Ni}}{a_{Cu} - a_{Ni}} \quad (1)$$

Donde ‘a_{Ni}’ 3.5238 Å y ‘a_{Cu}’ 3.6077 Å son los parámetros de red de Ni y Cu, respectivamente. La composición elemental y la morfología superficial del material sintetizado se determinaron en un microscopio electrónico de barrido ESEM FEI QUANTA 200 (20–25) KV sobre cinta de carbono. El tamaño promedio de partícula (TP) y la desviación estándar (σ) se realizó por medición directa de 100 partículas de cada micrografía.

2. Resultados y discusión

2.1 Síntesis de materiales

En la Figura 1 se muestran los patrones de difracción de la fase sintetizada (E) y teóricos (T) de referencia, donde se identificó la fase Ni_{0.76}Cu_{0.24} con tarjeta de referencia 03-2249 en la base de datos cristalográficos [10]. Se agrega los difractogramas de Ni (04–0850) y Cu (01–1241) metálico, para corroborar la no presencia de las fases como remanentes de reacción. El TC de la fase de Ni_{0.76}Cu_{0.24} es 33 nm y contiene una X_{Cu}= 0.19 en la aleación, ver Tabla 1. Lo anterior concuerda con lo calculado por la ley de Vegard, y corresponde de buena manera con la fase identificada en la base de datos, si bien hay una diferencia en el contenido de la X_{Cu} de 0.05, el parámetro de red tiene una diferencia de 0.003 Å, lo cual no es significativa (0.14 %). Se logra observar que el parámetro de red (a) (Figura 2) se modifica de acuerdo a la X_{Cu} en la aleación, tanto en lo obtenido con la ley de Vegard (■) y el reportado en las 9 tarjetas existentes en la base de datos [10]. Se logró observar que de acuerdo a la estequiometría utilizada en la síntesis la aleación debía ser Ni_{0.75}Cu_{0.25}, sin embargo, bajo las condiciones de síntesis utilizadas y metodología propuesta favorecen la fase cristalina identificada como Ni_{0.76}Cu_{0.24} (E).

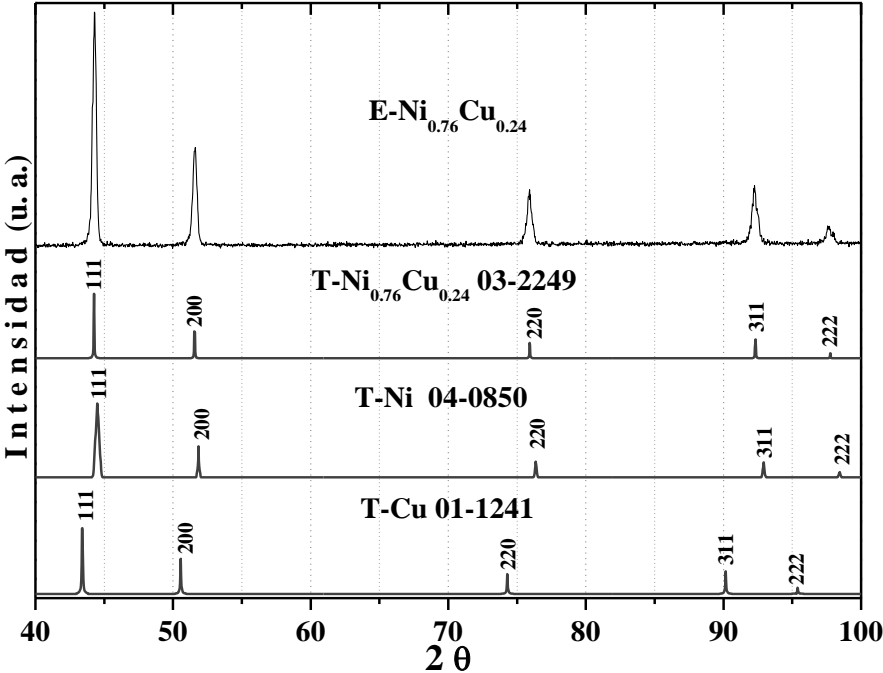


Figura 1. Espectros por XRD obtenidos experimentalmente (E) y teóricos (T) de las fases de $Ni_{0.76}Cu_{0.24}$, Ni y Cu [10, 12], donde se confirma solo la presencia de la aleación $Ni_{0.76}Cu_{0.24}$.

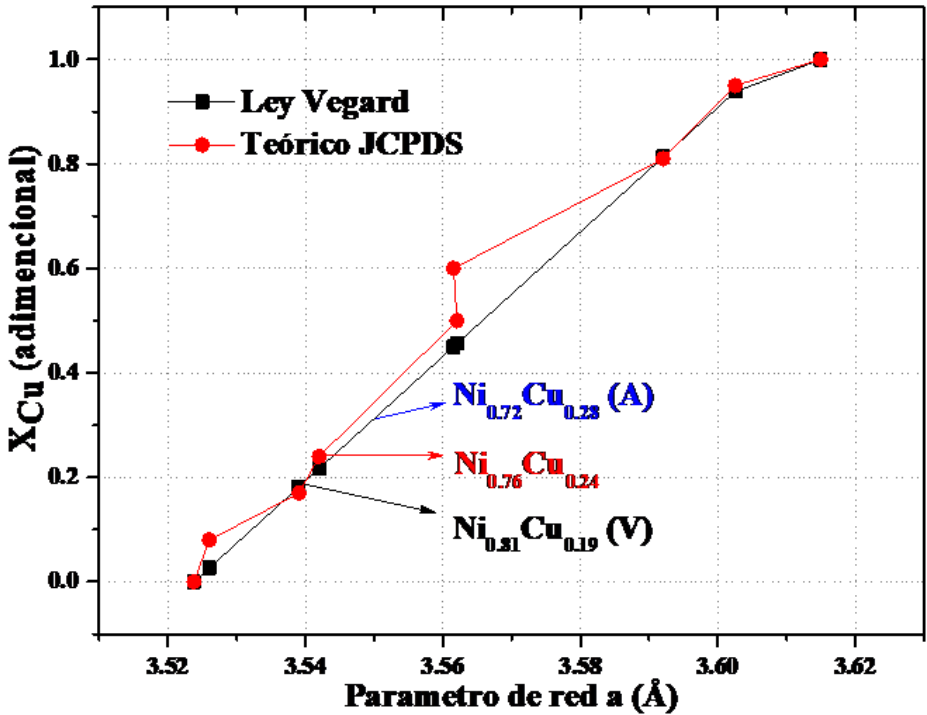


Figura 2. Parámetro de red con respecto a la fracción de Cu en aleaciones Ni-Cu, calculado por ley de Vegard (□) (V) y reportado en JCPDS-ICDD (A), así como la aleación esperada de acuerdo al % atómico por EDS (A).

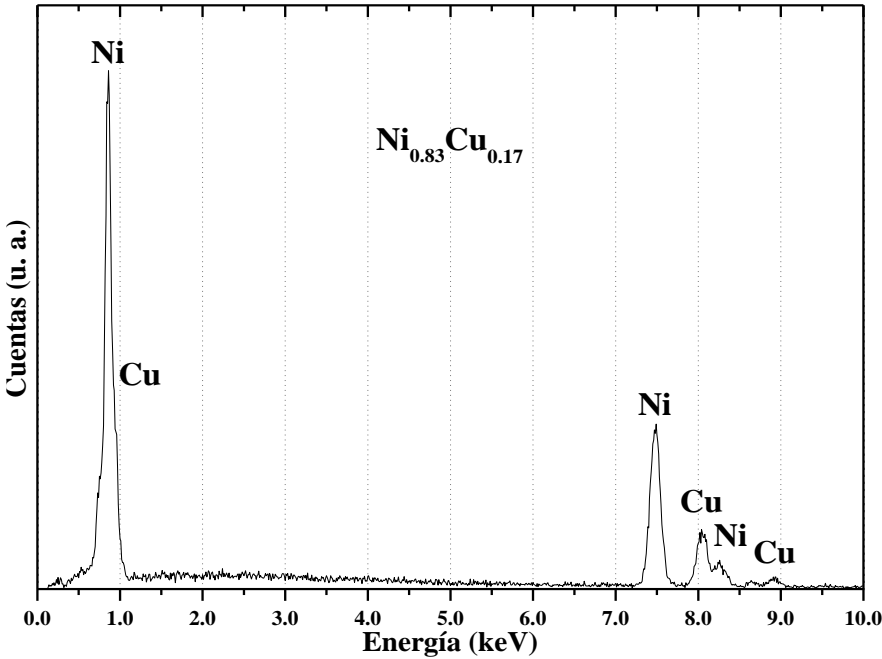


Figura 3. Espectro por EDS de la fase Ni_{1-x}Cu_x y señales características de los elementos contenidos.

El % Wt y σ (Tabla 1) se obtuvo de diferentes zonas puntuales en la muestra. Los espectros por EDS muestran únicamente señales características de Ni y Cu con % At Ni= 0.72 y Cu= 0.28, no se encontraron otros elementos como agentes contaminantes o remanentes de reacción, esto concuerda con lo obtenido por XRD, ya que solo se identificó una fase presente en la muestra. Al comparar la XCu de las aleaciones obtenidas por XRD, EDS y por ley de Vegard, podemos mencionar que hay mayor

diferencia entre el resultado de XCu obtenido por XRD (V) y EDS (A), que el comparativo de XRD con el calculado por la ley de Vegard (Figura 2), lo que deja de manifiesto que la ley de Vegard explica de buena forma el contenido de cobre en las aleaciones con Ni, debido a que se obtiene directamente del parámetro de red experimental ver Figura 1 índice (002).

Tabla 1. Propiedades físicas y composición de la fase Ni_{0.76}Cu_{0.24} sintetizada vía descomposición térmica.

| TC (nm) | X _{cu} | TP (nm) l x h ± σ | Wt ± σ (%) | At ± σ (%) |
|---------|-----------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| 33 | 0.19 | 659 ± 123 | Ni: 70.3 ± 1.3 | Ni: 71.9 ± 1.3 |
| | | 416 ± 102 | Cu: 29.7 ± 1.3 | Cu: 28.1 ± 1.3 |

X_{Cu}: Por ley de Vegard, Wt: % en peso elemental, At: % atómico por EDS y σ : Desviación estándar.

En las imágenes por SEM, se observan partículas con morfología semiesférica que al aglomerarse genera cúmulos con formas heterogéneas en la aleación de Ni_{0.76}Cu_{0.24}, el material presenta una textura lisa con

cavidades y poros de diferentes tamaños y formas, las marcas indicadas (Figura 4a) hacen referencia a zonas donde se determinó el %Wt y %At utilizado para determinar el promedio de Ni y Cu (Tabla 1).

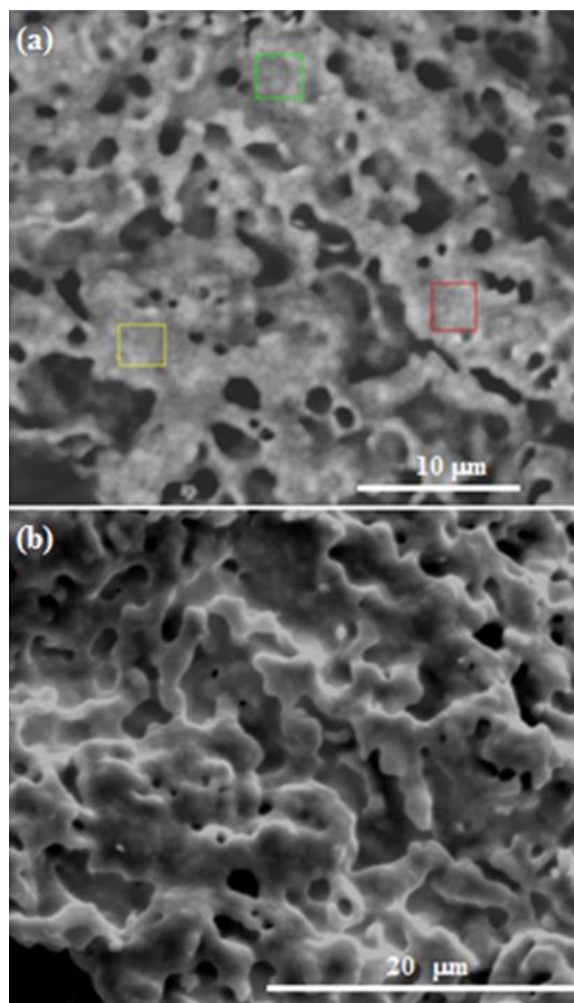


Figura 4. Micrografías por SEM de retrodispersados (a) y secundarios (b) de la muestra sintetizada, la cual presenta morfología tipo semiesférica (a) y aglomeramiento con forma indefinidas porosas (b).

3. Conclusiones

En este trabajo se sintetizó la fase $\text{Ni}_{0.76}\text{Cu}_{0.24}$ a partir de la descomposición térmica de los hidratos de Ni y Cu. El material se obtuvo puro, con TC: 33 nm y TPP: 659 x 416 nm, por lo anterior, se recomienda la metodología propuesta para obtener la fase de $\text{Ni}_{0.76}\text{Cu}_{0.24}$ pura, con posible aplicación en el campo de la catálisis industrial.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo financiero a través de los proyectos CB-2010-01-151551 (CONACYT), 300-1377 300-1474 y 300/6/N/84/19 (UABC). Estamos muy agradecidos con G. Labrada y B. Rivera por su asistencia técnica en el análisis de las muestras, así como a las instituciones FCQI-UABC y LINAN-IPICYT por proporcionar servicios de laboratorio a través de L. E. Palafox Maestre y M. Ávalos Borja.



Referencias

- [1] J. Pinilla, I. Suelves, M. Lázaro, R. Moliner, and J. Palacios, "Parametric Study of the Decomposition of Methane Using a NiCu/Al₂O₃ Catalyst in a Fluidized Bed Reactor," *International Journal of Hydrogen Energy*; vol. 35, pp. 9801-9809, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.10.008>
- [2] J. Pinilla, I. Suelves, M. Lázaro, R. Moliner, and J. Palacios, "Influence of Nickel Crystal Domain Size on the Behaviour of Ni and NiCu Catalysts for the Methane Decomposition Reaction," *Applied Catalysis A: General*; vol. 363, pp. 199-207, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2009.05.009>
- [3] S. Ahn, H. Park, I. Choi, S. Yoo, S. Hwang, H. Kim, E. Cho, C. Yoon, H. Park, H. Son, J. Hernandez, S. Nama, T. Lim, S. Kim, and J. Jang, "Electrochemically Fabricated NiCu Alloy Catalysts for Hydrogen Production in Alkaline Water Electrolysis," *International Journal of Hydrogen Energy*; vol. 38, pp. 13493-13501, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.103>
- [4] N. Homs, J. Llorca, and P. Ramírez de la Piscina, "Low-temperature Steam-Reforming of Ethanol Over ZnO-Supported Ni and Cu Catalysts the Effect of Nickel and Copper Addition to ZnO-Supported Cobalt-Based Catalysts," *Catalysis Today*; vol. 116, pp. 361-366, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2006.05.081>
- [5] M. Illán Gómez, S. Brandán, M. Salinas, and A. Linares, "Improvements In NO_x Reduction by Carbon Using Bimetallic Catalysts," *Fuel*; vol. 80, pp. 2001-2005, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00091-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00091-6)
- [6] T. Fujita, H. Abe, T. Tanabe, Y. Ito, T. Tokunaga, S. Arai, Y. Yamamoto, A. Hirata, and M. Chen, "Earth Abundant and Durable Nanoporous Catalyst for Exhaust-Gas Conversion," *Adv Funct Mater*; vol. 26, pp. 1609-1616, 2016. <https://doi.org/10.1002/adfm.201504811>
- [7] E. Vesselli, E. Monachino, M. Rizzi, S. Furlan, X. Duan, C. Dri, A. Peronio, C. Africh, P. Lacovig, A. Baldereschi, G. Comelli, and M. Peressi, "Steering the Chemistry of Carbon Oxides on a NiCu Catalyst," *ACS Catalysis*; vol. 3, pp. 1555-1559, 2013. <https://doi.org/10.1021/cs400327y>
- [8] Z. Yan, Z. Xu, W. Zhang, S. Zhao, and Y. Xu, "A Novel Electrochemical Nitrobenzene Sensor Based on NiCu Alloy Electrode," *Int J Electrochem Sci*; vol. 7, pp. 2938-2946, 2012. <http://www.electrochemsci.org/papers/vol7/7042938.pdf>
- [9] V. Vegard, "Die Konstitution der Mischkristalle und die Raumfüllung der Atome". *Zeitschrift für Physik*. Bd V, 17-26, 1921. <https://doi.org/10.1007/BF01349680>
- [10] Joint Committee on Powder Diffraction Standards International Centre for Diffraction Data. 2012. <https://doi.org/10.1021/ac60293a779>
- [11] A. Patterson, "The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination," *Physical Review*; vol. 56, pp. 978-982, 1939. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.978>
- [12] W. Kraus, G. Nolse, "PowderCell for Windows". Federal Institute for Materials Research and Testing Rudower Chausse 5. Germany, 2000. http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/powdcell/a_v/v_1/powder/e_cell.html



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir—copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento—remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)



Estudio DFT a moléculas derivadas de benzimidazol y piridina con capacidad inhibidora de corrosión

Study on benzimidazole and pyridine derived molecules with corrosion, inhibitory capacity

Reyes-Corrales Jorge¹, Soto-Royo Rody¹, Glossman-Miknit Daniel², Baldenebro-López Jesús¹

¹Facultad de Ingeniería Mochis, Universidad Autónoma de Sinaloa. Prol. Ángel Flores y Fuente de Poseidón, S/N, C.P. 81223, Los Mochis, Sinaloa; México

²NANOCOSMOS Virtual Lab, Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. Miguel de Cervantes 120, C.P. 31136, Chihuahua, Chihuahua; México

Autor de correspondencia: Jesús Baldenebro-López, Ángel Flores y Fuente de Poseidón S/N, Colonia Las Fuentes, C.P. 81223, Los Mochis, Sinaloa, México. E-mail: jesus.baldenebro@uas.edu.mx. ORCID: 0000-0002-2186-9552.

Recibido: 30 de Junio del 2018 **Aceptado:** 11 de Noviembre del 2018 **Publicado:** 15 de Enero del 2019

Resumen. - *Los inhibidores basados en heteroátomos de nitrógeno han mostrado ser uno de los productos químicos eficaces en la inhibición de la corrosión de metales. Este estudio fue llevado a cabo con la teoría de funcionales de la densidad (DFT), utilizando distintos niveles de cálculo. Diversas propuestas fueron evaluadas para estimar los niveles de energía de los orbitales moleculares de frontera (HOMO-LUMO) y su isodensidad. Dichos parámetros fueron considerados para determinar la parte nucleofílica y electrofílica de las moléculas. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de la reactividad química con los parámetros de afinidad electrónica, el potencial de ionización, la dureza química y el índice de electrofiliidad; el objetivo fue determinar el efecto sobre la dureza química al cambiar la posición de los sustituyentes.*

Palabras clave: Inhibidores; DFT; Heterocíclicos; Piridina; Benzimidazol; Corrosión.

Abstract. - *Inhibitors based on nitrogen heteroatoms have been shown to be one of the effective chemicals in inhibiting metal corrosion. This study was carried out with the density functional theory (DFT), using different levels of calculation. Several proposals were evaluated to estimate the energy levels of the frontier molecular orbitals (HOMO-LUMO) and their isodensity. These parameters were considered to determine the nucleophilic and electrophilic part of the molecules. Finally, an analysis of the chemical reactivity parameters was carried out with electronic affinity, ionization potential, chemical hardness and electrophilicity index; the objective was to determine the effect about chemical hardness by changing the position of the substituents.*

Keywords: Inhibitors; DFT; Heterocyclic; Pyridine; Benzimidazole; Corrosion.



1. Introducción

Una de las principales pérdidas millonarias en las industrias (principalmente petroleras), se debe a la corrosión de los materiales, tales como tuberías, codos, equipos y cualquier otro material metálico que se encuentre en contacto con un medio agresivo [1]. Para detener el avance de la corrosión en los materiales metálicos a causa de los medios ácidos, se han desarrollado diferentes métodos para su control y prevención. El uso de inhibidores es uno de los métodos tradicionales más utilizados para disminuir la velocidad de corrosión, que a través de bajas concentraciones controlan los efectos de la corrosión [2]. En la Figura 1 se pueden observar distintas propuestas utilizadas en esta investigación basadas en derivados de benzimidazol y piridina. Dichos derivados han demostrado ser buenos inhibidores de corrosión en diferentes tipos de metales tales como acero y aluminio, en medios acuosos de HCl [3, 4].

En este trabajo de investigación, se realizó un estudio teórico a distintos derivados de benzimidazol y piridina con potencial aplicación como inhibidores de corrosión. Las estructuras se evaluaron con diferentes niveles de teoría. Tales como, híbridos GGA (PBE0), híbridos meta-GGA (M06-2X), meta-NGA (MN12-SX) y meta-GGA de rango separado (M11-L).

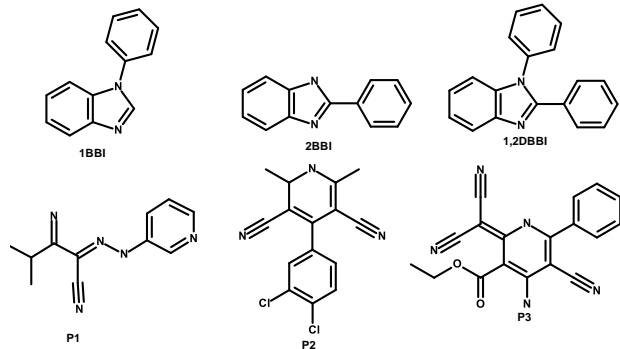


Figura 1. Derivados de benzimidazol y piridina.

1. Detalles computacionales

Las optimizaciones de geometrías de las estructuras moleculares del estado fundamental se llevaron a cabo con los funcionales de la densidad: M11-L [5], PBE0 [6], MN12-SX [7] y M06-2X [8]. Los funcionales fueron combinados usando los conjunto base 6-311G(d), 6-311G+(d), 6-311+G(d,p) [9] y MIDIY [10]. Todos los niveles de cálculo mostraron

la misma tendencia de los resultados obtenidos, por lo tanto, el funcional PBE0 fue elegido para mostrar los parámetros de reactividad química [11–13] tales como: dureza química (η), índice de electrofilicidad (ω), poder electrodonador (ω^-) y poder electroceptor (ω^+).

2. Resultados

2.1 Orbitales moleculares de frontera y niveles de energía HOMO y LUMO

Los orbitales moleculares de frontera HOMO (orbital molecular más alto ocupado) y LUMO (orbital molecular más bajo desocupado), así como su distribución de isodensidades de la estructura de mínima energía están relacionados con la actividad del inhibidor [14], es decir, estos orbitales de frontera pueden dar un indicio de la parte nucleofílica (atribuida al HOMO) y electrofílica (atribuida al LUMO) de la molécula.

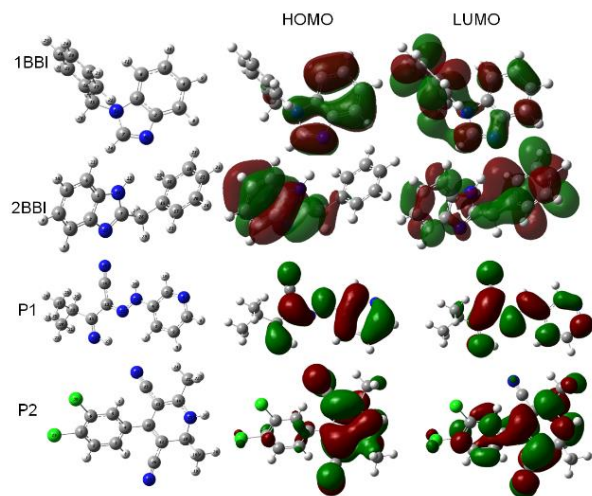


Figura 2. Orbitales moleculares de frontera.

La Figura 2 muestra la distribución de los orbitales HOMO y LUMO, donde se denota una concentración del orbital HOMO tanto para 1BBI y 2BBI preferentemente sobre el benzimidazol, mientras que el orbital LUMO se encuentra distribuido sobre toda la molécula. Estos resultados nos indican que la molécula tendería principalmente a anclarse a la superficie metálica a través del benzimidazol, puesto que, de acuerdo con Turcio-Ortega *et al.* el HOMO de la molécula está involucrado en la reacción de quimisorción con el LUMO del metal, y la eficiencia



de absorción depende de cómo se traslapan estos orbitales [15].

Los orbitales HOMO y LUMO para P1 se observan distribuidos sobre toda la molécula a excepción del grupo carbonilo, que pueden actuar como la parte hidrofóbica de la molécula. Por otro lado, en la propuesta P2 la isodensidad HOMO se localiza mayormente concentrada sobre el anillo aromático de la piridina y los grupos ciano, esto nos indica que las propuestas P1 y P2 se anclan a la superficie metálica a través de la piridina o alguno de los heteroátomos de nitrógeno distribuidos sobre las propuestas de piridina. Los cálculos de los niveles de energía de los orbitales moleculares en fase gas se realizaron utilizando únicamente el nivel de cálculo PBE0/6-31G(d), esto se debe a que la literatura reporta que un funcional con un 20-30% de la energía intercambio exacto Hartree-Fock representa una buena aproximación en el cálculo de la diferencia de energía HOMO y LUMO [16-18]; además, la propuesta del funcional representa un menor costo computacional respecto de otras metodologías.

La Figura 3 muestra los niveles de energía y band gap de derivados de benzimidazol, donde se puede observar que sin importar el conjunto base utilizado tienen una aproximación del band gap muy similar, por lo tanto, cualquiera de los conjuntos base estudiados puede ser utilizado para este fin. Además, la posición del grupo fenil (1BBI y 2BBI) o inclusión de otro fenil (1,2DBBI) al benzimidazol no disminuye o aumenta el valor del band gap de manera significativa.

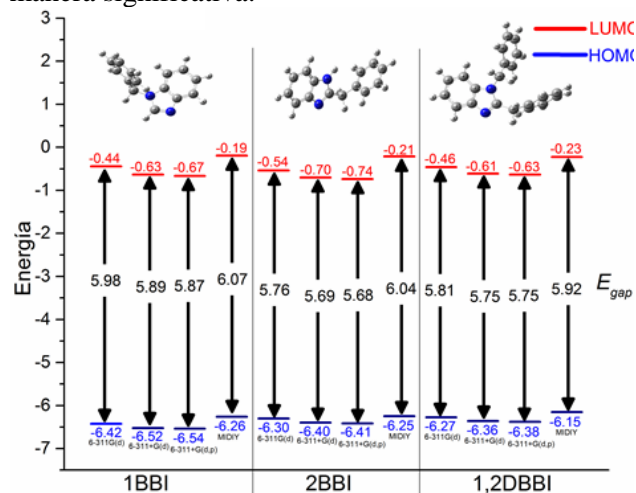


Figura 3. Predicción de niveles de energía HOMO-LUMO para los derivados de benzimidazol.

Para el caso de los derivados de piridina, en la Figura 4 se observa, al igual que 1BBI, 2BBI y 2DBBI, el conjunto base no es relevante en el cálculo del band gap, por lo cual puede utilizarse cualquiera de ellos. Además, se puede observar que P1 presenta el band gap más pequeño y sus niveles de energía HOMO y LUMO se encuentran desplazados a valores más negativos. Algunos autores, relacionan este parámetro con la eficiencia de inhibición, es decir, cuanto más bajo es el nivel de energía HOMO existe una mayor eficiencia de inhibición. Además, valores menos negativo en el nivel de energía HOMO indica que el modo de adsorción de la molécula al metal se da por quimisorción y no por fisorción [19].

Lo anterior sugiere que P1 es la molécula potencialmente con mayor eficiencia de inhibición, seguida por P2. Por otro lado, es sabido que el band gap está directamente relacionado con la dureza química e inversamente relacionado con la blandura química de las moléculas inhibitoras [20], así, valores altos de band gap nos indican moléculas duras y no polarizables, mientras que bajos band gap nos indican moléculas blandas y polarizables. Debido a lo anterior se realizó un estudio de los parámetros de reactividad química.

2.2 Parámetros de reactividad química

Para el estudio de reactividad química se calcularon las energías moleculares de las especies iónicas y neutras de todas las estructuras propuestas. A partir de estos valores se calcularon algunos parámetros de reactividad química, tales como: poder electrodonador (ω^-), electroaceptor (ω^+), dureza química (η) e índice de electrofilicidad (ω).

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos para los derivados de benzimidazol. Se observa que al cambiar la posición del fenil ubicado en el heteroátomo N13 (1BBI) al C7 (2BBI), el valor de la η no disminuye. Por lo tanto, para este caso, la posición del fenil o incluso agregar otro fenil como se muestra en la propuesta 1,2DBBI, el valor de η no sufre cambio. Además, en la Figura 3, se observa que el band gap no disminuye de manera significativa al cambiar de posición el grupo fenil o al agregar un fenil más a la molécula, tal como ocurre con la dureza química.

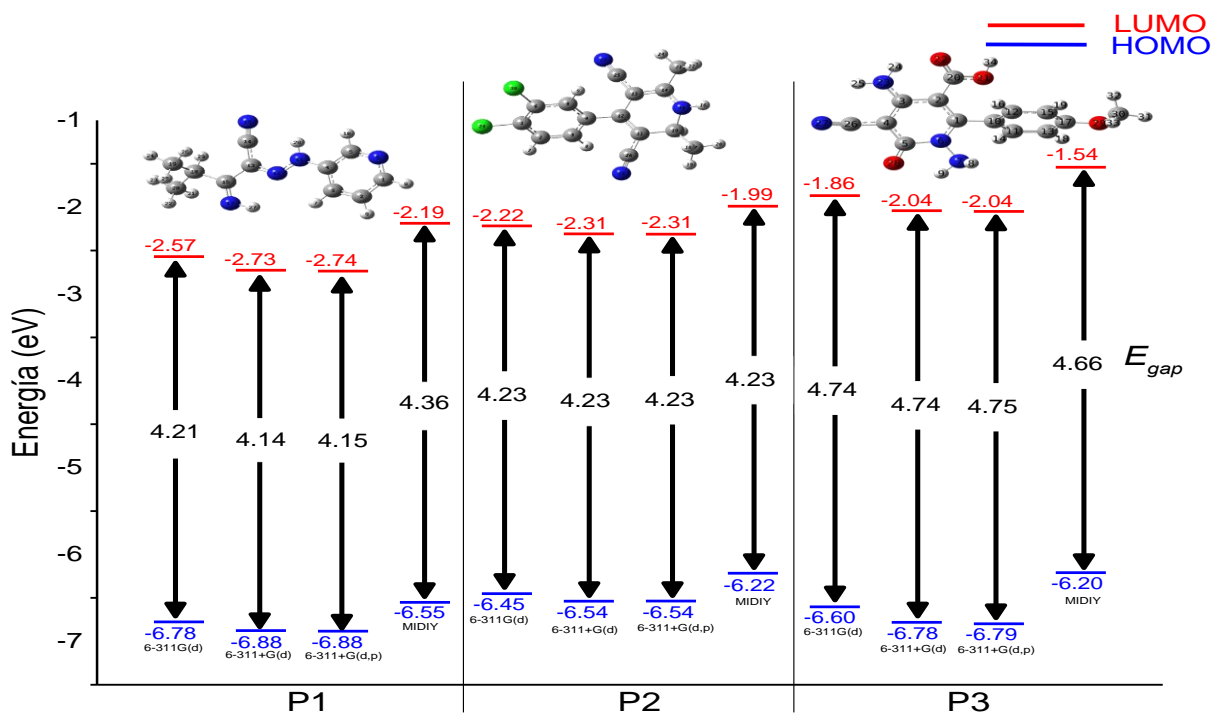


Figura 4. Predicción de niveles de energía HOMO-LUMO para los derivados de piridina.

Tabla 1. Parámetros de reactividad química para derivados de benzimidazol.

| | Conjunto base | η | ω | ω^- | ω^+ |
|---------|---------------|--------|----------|------------|------------|
| 1BBI | 6-311G(d) | 8.9889 | 0.7037 | 3.7475 | 0.1908 |
| | 6-311+G(d) | 8.6782 | 0.8191 | 4.0658 | 0.2953 |
| | 6-311+G(d,p) | 8.6673 | 0.8286 | 4.0939 | 0.3040 |
| | MIDIY | 9.2672 | 0.5908 | 3.4153 | 0.1062 |
| 2BBI | 6-311G(d) | 8.7426 | 0.7197 | 3.7594 | 0.2121 |
| | 6-311+G(d) | 8.5526 | 0.8000 | 3.9841 | 0.2849 |
| | 6-311+G(d,p) | 8.5396 | 0.8108 | 4.0159 | 0.2947 |
| | MIDIY | 9.1048 | 0.6211 | 3.4927 | 0.1297 |
| 1,2DBBI | 6-311G(d) | 8.5944 | 0.7255 | 3.7537 | 0.2224 |
| | 6-311+G(d) | 8.3264 | 0.7992 | 3.9428 | 0.2947 |
| | 6-311+G(d,p) | 8.3918 | 0.8177 | 4.0123 | 0.3076 |
| | MIDIY | 8.7582 | 0.6322 | 3.4756 | 0.1479 |

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos de los parámetros de reactividad química para los derivados de piridina, donde puede observarse que las propuestas P1 y P2 muestran una menor η , por lo tanto, estas moléculas tienden a ser más blandas y por ello tenderían a una mejor transferencia de carga entre la molécula y el metal.

Por otro lado, de acuerdo con Kaya *et-al.* [20], un índice de electrofilicidad alto sugiere una mejor transferencia de carga de la molécula hacia el metal, por lo tanto, una mayor eficiencia de inhibición. Así, P1 y P2 muestran mayor índice de electrofilicidad y consecuentemente tendrían mayor eficiencia de inhibición.



Tabla 2. Parámetros de reactividad química para derivados de piridina.

| | Conjunto base | η | ω | ω^- | ω^+ |
|----|---------------|--------|----------|------------|------------|
| P1 | 6-311G(d) | 7.1452 | 1.5180 | 5.8112 | 1.1538 |
| | 6-311+G(d) | 6.9947 | 1.6453 | 6.1264 | 1.3289 |
| | 6-311+G(d,p) | 6.9887 | 1.6537 | 6.1481 | 1.3403 |
| | MIDIY | 7.4265 | 1.2735 | 5.1857 | 0.8365 |
| P2 | 6-311G(d) | 6.9420 | 1.3673 | 5.3470 | 0.9900 |
| | 6-311+G(d) | 6.8614 | 1.4418 | 5.5364 | 1.0884 |
| | 6-311+G(d,p) | 6.8540 | 1.4446 | 5.5426 | 1.0926 |
| | MIDIY | 7.0930 | 1.2047 | 4.9198 | 0.7857 |
| P3 | 6-311G(d) | 7.4168 | 1.2121 | 5.0079 | 0.7676 |
| | 6-311+G(d) | 7.3330 | 1.3307 | 5.3285 | 0.9109 |
| | 6-311+G(d,p) | 7.3431 | 1.3377 | 5.3506 | 0.9182 |
| | MIDIY | 7.4994 | 1.0109 | 4.4375 | 0.5436 |

3. Conclusiones

El estudio de los orbitales moleculares de frontera muestra que la densidad electrónica del HOMO se localiza principalmente sobre los anillos heterocíclicos, específicamente sobre los heteroátomos de N, a excepción del Cl, mientras que el LUMO se encuentra distribuido en toda la molécula a excepción de los feniles y grupos carbonilos. Así, puede concluirse que las moléculas inhibitoras estudiadas aquí se anclarían al metal por el átomo de N. Se determinaron los niveles de energía y band gap a todos los inhibidores estudiados observando que los sistemas P1 y P2 tienen menor band gap y sus niveles de energía están más desplazados hacia valores más negativos, lo cual sugiere que estas moléculas tendrían una mejor eficiencia de inhibición. De acuerdo a los parámetros de reactividad química, tanto valores bajos de dureza química como valores altos del índice de electrofilicidad nos dan un indicio que P1 y P2 podrán tener una mejor transferencia y una mejor eficiencia de inhibición, además coincide con los resultados obtenidos en el estudio de HOMO-LUMO gap.

Agradecimientos

Se le agradece a la Universidad Autónoma de Sinaloa por prestar sus instalaciones para la realización del proyecto; a CONACYT por la beca otorgada con el número 443166; al Dr. Daniel Glossman Mitnik, responsable del NANOCOSMOS Virtual Lab ubicado en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV) por su contribución al trabajo; a los doctores Rody Soto Rojo y Jesús

Baldenebro-López por su colaboración en la asesoría y dirección del proyecto.

Referencias

- [1] I. B. Obot and A. Madhankumar, "Synergistic effect of iodide ion addition on the inhibition of mild steel corrosion in 1 M HCl by 3-amino-2-methylbenzylalcohol," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 177, pp. 266-275, Jul. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.04.027>
- [2] M. Lashgari, M. R. Arshadi, G. a Parsafar, and V. S. Sastri, "Cluster/Polarized Continuum Models for Density Functional Theory Investigations of Benzimidazole Corrosion Inhibitors at Metal/Solution Interface," *Corrosion*, vol. 62, no. 3, pp. 199-206, Mar. 2006. <https://doi.org/10.5006/1.3278266>
- [3] E. Garcia-Ochoa, S. J. Guzmán-Jiménez, J. G. Hernández, T. Pandiyan, J. M. Vásquez-Pérez, and J. Cruz-Borbolla, "Benzimidazole ligands in the corrosion inhibition for carbon steel in acid medium: DFT study of its interaction on Fe30 surface," *J. Mol. Struct.*, vol. 1119, pp. 314-324, Sep. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.04.057>
- [4] O. Krim, A. Elidrissi, B. Hammouti, A. Ouslim, and M. Benkaddour, "Synthesis, characterization, and comparative study of pyridine derivatives as corrosion inhibitors of mild steel in hcl medium," *chem. eng. commun.*, vol. 196, no. 12, pp. 1536-1546, aug. 2009. <https://doi.org/10.1080/00986440903155451>
- [5] R. Peverati and D. G. Truhlar, "M11-L: A Local Density Functional That Provides Improved Accuracy for Electronic Structure Calculations in Chemistry and Physics," *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 117-124, Jan. 2012. <https://doi.org/10.1021/jz201525m>



- [6] C. Adamo and V. Barone, "Toward reliable density functional methods without adjustable parameters: The PBE0 model," *J. Chem. Phys.*, vol. 110, no. 13, p. 6158, 1999. <https://doi.org/10.1063/1.478522>
- [7] R. Peverati and D. G. Truhlar, "Screened-exchange density functionals with broad accuracy for chemistry and solid-state physics," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 14, no. 47, p. 16187, 2012. <https://doi.org/10.1039/c2cp42576a>
- [8] Y. Zhao and D. G. Truhlar, "The M06 suite of density functionals for main group thermochemistry, thermochemical kinetics, noncovalent interactions, excited states, and transition elements: two new functionals and systematic testing of four M06-class functionals and 12 other function," *Theor. Chem. Acc.*, vol. 120, no. 1-3, pp. 215-241, May 2008. <https://doi.org/10.1007/s00214-007-0310-x>
- [9] L. A. Curtiss, P. C. Redfern, V. Rassolov, G. Kedziora, and J. A. Pople, "Extension of Gaussian-3 theory to molecules containing third-row atoms K, Ca, Ga-Kr," *J. Chem. Phys.*, vol. 114, no. 21, p. 9287, 2001. <https://doi.org/10.1063/1.1366337>
- [10] C. J. Cramer, *Essentials of Computational Chemistry: theories and models*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2013. <https://www.wiley.com/en-us/Essentials+of+Computational+Chemistry%3A+Theories+and+Models%2C+2nd+Edition-p-9780470091821>
- [11] R. G. Parr and R. G. Pearson, "Absolute hardness: companion parameter to absolute electronegativity," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 105, no. 26, pp. 7512-7516, Dec. 1983. <https://doi.org/10.1021/ja00364a005>
- [12] J. L. Gázquez, A. Cedillo, and A. Vela, "Electrodonating and Electroaccepting Powers," *J. Phys. Chem. A*, vol. 111, no. 10, pp. 1966-1970, Mar. 2007. <https://doi.org/10.1021/jp065459f>
- [13] R. G. Parr, L. v. Szentpály, and S. Liu, "Electrophilicity Index," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 121, no. 9, pp. 1922-1924, Mar. 1999. <https://doi.org/10.1021/ja983494x>
- [14] J. Cruz, R. Martínez, J. Genesca, and E. García-Ochoa, "Experimental and theoretical study of 1-(2-ethylamino)-2-methylimidazoline as an inhibitor of carbon steel corrosion in acid media," *J. Electroanal. Chem.*, vol. 566, no. 1, pp. 111-121, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2003.11.018>
- [15] D. Turcio-Ortega, T. Pandiyan, J. Cruz, and E. Garcia-Ochoa, "Interaction of Imidazoline Compounds with Fe_n (n = 1-4 Atoms) as a Model for Corrosion Inhibition: DFT and Electrochemical Studies," *J. Phys. Chem. C*, vol. 111, no. 27, pp. 9853-9866, Jul. 2007. <https://doi.org/10.1021/jp0711038>
- [16] T. M. McCormick et al., "Conjugated polymers: Evaluating DFT methods for more accurate orbital energy modeling," *Macromolecules*, vol. 46, pp. 3879-3886, 2013. <https://doi.org/10.1021/ma4005023>
- [17] R. V. Solomon, A. P. Bella, S. A. Vedha, and P. Venuvanalngam, "Designing benzosiloles for better optoelectronic properties using DFT & TDDFT approaches," *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 14, no. 41, pp. 14229-37, 2012. <https://doi.org/10.1039/c2cp41554b>
- [18] U. Salzner, J. B. Lagowski, P. G. Pickup, and R. a. Poirier, "Comparison of geometries and electronic structures of polyacetylene, polyborole, polycyclopentadiene, polypyrrole, polyfuran, polysilole, polyphosphole, polythiophene, polyselenophene and polytellurophene," *Synth. Met.*, vol. 96, no. 3, pp. 177-189, Aug. 1998. [https://doi.org/10.1016/S0379-6779\(98\)00084-8](https://doi.org/10.1016/S0379-6779(98)00084-8)
- [19] M. J. Bahrami, S. M. A. Hosseini, and P. Pilvar, "Experimental and theoretical investigation of organic compounds as inhibitors for mild steel corrosion in sulfuric acid medium," *Corros. Sci.*, vol. 52, no. 9, pp. 2793-2803, Sep. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.04.024>
- [20] S. Kaya, B. Tüzün, C. Kaya, and I. B. Obot, "Determination of corrosion inhibition effects of amino acids: Quantum chemical and molecular dynamic simulation study," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 58, pp. 528-535, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.06.009>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)



Diabetic foot ulcers treatment with silver nanoparticles

Tratamiento de las úlceras del pie diabético con nanopartículas de plata

Almonaci Hernández Cesar Alejandro¹, Cabrera Torres Isis Marion¹, López-Acevedo Rosangela¹, Juárez-Moreno Karla Oyuki^{2,3}, Castañeda-Juárez Martin E.⁴, Almanza-Reyes Horacio⁵, Pestryakov Alexey⁶, Bogdanchikova Nina²

¹Integral and Advance Clinic, Ensenada, Baja California, México.

²Center of Nanoscience and Nanotechnology, National Autonomous University of Mexico. Km107 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, Baja California, México.

³CONACYT Research Fellow at Center of Nanoscience and Nanotechnology, National Autonomous University of Mexico. Ensenada, Baja California, México.

⁴School of Medicine. National Autonomous University of Mexico, Ensenada, Baja California, México

⁵School of Medicine and Psychology, Campus Tijuana. Autonomous University of Baja California, Tijuana, Baja California, México.

⁶Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

Corresponding author: Nina Bogdanchikova, Center of Nanoscience and Nanotechnology, National Autonomous University of Mexico. Km107 Carretera Tijuana-Ensenada, Baja California, México. E-mail: nina@cnyu.unam.mx. ORCID: 0000-0003-0929-3535.

Recibido: 01 de Julio del 2018 **Aceptado:** 12 de Diciembre del 2018 **Publicado:** 20 de Enero del 2019

Resumen. - *Las úlceras del pie diabético son altamente susceptibles a infecciones microbianas y son la principal causa de hospitalización y amputación de extremidades inferiores en pacientes diabéticos. Debido a sus propiedades antimicrobianas y anti-inflamatorias, las nanopartículas de plata (AgNPs) son el nanomaterial más utilizado en biomedicina. En este trabajo presentamos el uso de AgNPs para el tratamiento de úlceras de pie diabético grado II de la clasificación de Wagner. Además del tratamiento con antibióticos convencionales, las úlceras fueron tratadas mediante la administración tópica de AgNPs a una concentración de 1.2 mg/mL de plata metálica. Los resultados obtenidos, revelan una mejora significativa en la evolución de las úlceras, en donde los bordes de la lesión se acercaron de manera efectiva, observándose tejido de granulación, disminución del edema y placas de fibrina. Estos resultados constituyen la base para nuevos estudios sobre el uso de AgNPs para el tratamiento de úlceras crónicas de diferentes orígenes.*

Palabras clave: Úlceras del Pie Diabético; Diabetes Mellitus; Nanopartículas de Plata; Nanomedicina; Úlceras Crónicas.

Abstract. - *Diabetic foot ulcers are highly susceptible to microbial infections and are the leading cause of lower limb hospitalization and amputation in diabetic patients. Due to their antimicrobial and anti-inflammatory properties, silver nanoparticles (AgNPs) are the most widely used nanomaterial in biomedicine. Herein, we present the usage of AgNPs for the treatment of diabetic foot ulcers with a stage II in Wagner classification. In addition to conventional antibiotic treatment, the ulcers were treated with topical administration of AgNPs at a concentration of 1.2 mg/ml of metallic silver. The results showed a significant improvement in the evolution of the ulcers, where the edges of the lesion were effectively approached, granulation tissue being observed, edema decreased and fibrin plaques. These results form the basis for further studies on the use of AgNPs for the treatment of chronic ulcers of different origins.*

Keywords: Diabetic Foot Ulcers; Diabetes Mellitus; Silver Nanoparticles; Nanomedicine; Chronic Ulcers.



1. Introduction

Diabetes mellitus (DM) is the second major cause of death in Mexico [1]. Twenty-five percentage of patients with DM developed complications of lower limbs known as diabetic foot ulcers (DFU) [2]. These types of ulcers are characterized by poly-microbial infection, ulceration and destruction of the deepest tissues of lower limbs, associated with neurologic alterations and diverse degrees of peripheral vascular disease [3]. Therefore, DFU are the main cause of hospitalization and lower limbs amputation [3][5].

The assessment of a patient with DFU starts with wound cleaning, debridement and antibiotic schedule treatment [7]. If no evidence of healing is shown and complications of the DFU such as gangrene and osteomyelitis are observed, then a surgical management is recommended involving the amputation of the lower limb [8].

Infection of DFU with multi-drug resistance (MDR) microorganisms may increase the time of wound healing, hospitalization, treatment costs and patient mortality [9]. Therefore, due to its well-known antimicrobial properties, silver has been extensively used in a wide variety of products on the market to treat bacterial infection and to prevent wound sepsis [10]. However, all of these formulations have limitations concerning the need for a high-frequency application and the inactivation of silver. In this sense, nanotechnology has generating new applications for biomedicine through the synthesis of nanomaterials [11]. One of the most used nanomaterial in medical products is silver nanoparticles (AgNPs).

Owning to their antibacterial and anti-inflammatory properties [12, 13], AgNPs have been intensively applied for wound healing

[13] but scarcely studied in vitro and in animal models for the treatment of diabetic ulcers, this may be due to the high risk of limb amputation in patients [14, 15]. However, the use of AgNPs to heal DFU in DM patients has never been studied before our group began to investigate it [16]. Taking this in consideration, the aim of this study is to investigate the potential use of AgNPs for the treatment of DFU in patients.

2. Methodology

2.1 Silver nanoparticle formulation

After comparison with different AgNPs commercially available, we concluded that only Argovit preparation resulted to have multiple certificates for their usage in veterinary and human applications [17]. Argovit (Scientific and Production Center Vector-Vita, Novosibirsk, Russia) is a preparation of highly dispersed AgNPs with an overall concentration of 200 mg/mL (20%) of polyvinylpyrrolidone-coated AgNPs in water. The content of metallic silver in Argovit preparation is 12 mg/ml, stabilized with 188 mg/ml of polyvinylpyrrolidone (PVP). AgNPs dilutions were calculated according to metallic silver content in Argovit preparation. Solutions of AgNPs were prepared with distilled and sterile water and were kept at 4°C in darkness.

2.2 Silver nanoparticle characterization

Size distribution and morphology of AgNPs were determined on the basis of the results obtained by high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM) using a JEOL-JEM-2010 microscope. Hydrodynamic radius and Zeta potential were measured by dynamic light scattering (DLS) (Malvern Instruments Zetasizer Nano NS model DTS 1060, UK)



equipped with a green laser operating at $\lambda = 532$ nm at 25 °C. AgNPs were characterized by UV-Vis spectroscopy in the range of 200 to 900 nm using a Cary 60 UV-Vis spectrophotometer (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA). Further characterization of lyophilized Argovit was performed with Fourier transform infrared spectroscopy-attenuated total reflectance (FTIR-ATR) analysis in the range of 400 to 4000 cm^{-1} with a resolution of 2 cm^{-1} on a universal diamond ATR top plate accessory (Perkin Elmer, USA); the sample spectrum was compared with that of standard solid PVP (Mw 100kD).

2.3 Method of topical AgNPs application

The novel method for topical administration of AgNPs for DFU treatment was developed by Med. César Alejandro Almonaci Hernández. The researching protocol for this study was approved by the Bioethic Committee of the General Hospital of Tijuana, Baja California Mexico. All patients included in this study signed an informed consent letter.

2.4 Clinical cases

Here it is presented two clinical cases of diabetic patients with a DFU of stage II according to Wagner classification. The first patient is a 46-years old male with a 10 years' evolution of controlled type-2 diabetes. He presented a non-improved plantar ulcer in the right forefoot at metatarsus level without vascular involvement. DFU area is approximately 4 cm. After surgical cleaning protocol and treatment with conventional antibiotics, the surface area of the wound did not diminished and no significant improvement was noticed. Second patient is a 40- years old male with 8 years' evolution of insulin- controlled type 2-diabetes. Patient referred the wound appear after 2 weeks of been subjected to an Achilles tendon surgery.

He presented a non- improved asymmetric ulcer in the back face of right leg with 5 cm in length. DFU presents a red-brown color with yellow patches of dispersed granular tissue. Although infection was not detected, wound could not be cured after almost 8 months. After surgical cleaning protocol and treatment with conventional antibiotics, the surface area of the wound did not diminished and no significant improvement was noticed. Therefore patient was included in this study.

2.5 AgNPs treatment of foot ulcer in diabetic patients

The treatment of DFU with AgNPs, started after the patient signed an informed consent letter given his approval to be included in the protocol.

Afterwards, a complete exploration of the wound area, debridement when necessary and cleaning with surgical soap solution. Was performed. Then topical administration of AgNPs solution (with a metallic silver concentration of 1.2 mg/ml) was done firstly, and this treatment was repeated every 24 h for 12 days. The amount of metallic silver to be applied in the injury was calculated on the basis of the content of metallic silver present in the AgNPs solution Argovit, as mentioned in section 2.1.

To record the evolution of the wound healing process, photographs were taken before and after the treatment with AgNPs.

3. Results

3.1. Silver nanoparticle characterization

Our group has recently reported physicochemical characteristic of AgNps [18]. In summary, AgNPs are spheroidal in morphology, the size distribution goes from 1 to 90 nm with an average size of 35 nm, and

their hydrodynamic radio considering both the PVP covering and the metallic silver nanoparticle is 70 nm. Zeta potential of AgNPs is -15 mV and their plasmon absorbance is found at 420 nm wavelength. A TEM micrograph of the AgNPs used in this study is shown in figure 1.

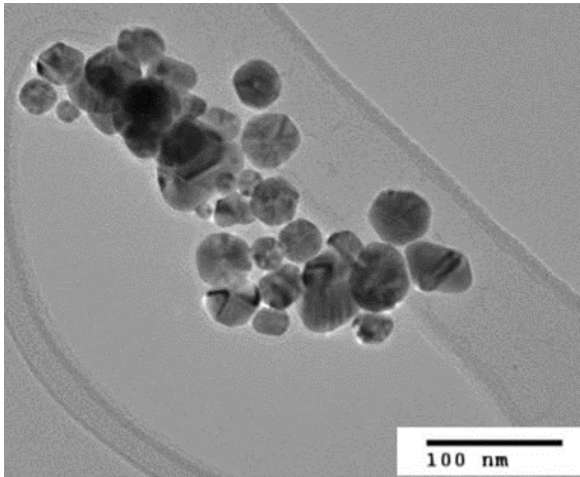


Figure 1. TEM image of AgNPs showing their spheroidal morphology and size.

3.2 Evolution of diabetic foot ulcer healing

The evolution of the wound healing process of DFU treated with AgNPs was documented by photography. In figure 2 it is observed the chronological evolution of DFU from two the patients. In figure 2A it is shown the initial appearance of a Wagner II ulcer after the debridement process. The DFU is located in the forefoot and imposed on the metatarsal region of the right foot. The extended area of the DFU is approximately of 3 cm x 4 cm and 0.4 cm deep, with irregular contours and hyperkeratosis active edges. After 8 days of treatment with AgNPs solution, there was an improvement of the ulcer with reduction of edema. It exhibits a red coloration without signs of infection. The outer contour of the ulcer shows a progressive decrease of granular tissue and fibrin plaques at the center of the ulcer. The evolution of the healing process after 12 days of topical administration of AgNPs solution, in this picture, a progressive

diminishment of the lesion extent is noticeable. An evident improvement of the coping is observed along the edges of the DFU while granulation tissue is depicted at the center of the ulcer. Indeed, the central zone of the ulcer shows a diminishment of its diameter with an evident improvement in the pigmentation that confirms the imminent re-epithelialization process with active edges that favoring closure of the injury.



Figure 2. Chronological evolution of the lesion of diabetic foot ulcers classified as Wagner grade II, treated with topical administration of AgNPs. DFU from (A) 46 years-old male patient with type-2 diabetes and (B) 40 years-old male patient with type-2 diabetes. In both figures (A and B) initial appearance of the ulcer is shown and the evolution of the DFU after several days of treatment with AgNPs solution.

Figure 2B depicts the initial Wagner II ulcer located in the back of the right leg forefoot. DFU has an extension of 5 cm approximately with asymmetric edges. After 18 days of treatment with AgNPs solution, there was 50% of improvement in healing process of the ulcer. DFU exhibits coping of active edges through re-epithelialization and no signs of infection were observed. The contours of DFU



show a progressive closure. The presence of granular tissue, red color and well-moisturized skin was observed. On day 26, the edges of the wound were active and allowed the coping of the borders of the lesion reducing its area. Granular tissue and red color in the middle of the ulcer were observed. Finally, after 45 days of treatment with AgNPs, DFU has attempted the closure in 95%. Granular tissue is observed along 5 cm. No edema, infection or flush was detected. Coping of wound edges was successful and reached the closure of the ulcer.

4. Conclusions

Thus, we present herein two clinical cases of successful treatment of diabetic foot ulcers of II degree of Wagner classification with AgNPs topically administered into the wound. Daily administration of AgNPs solution with metallic silver concentration of 1.2 mg/mL causes an improvement of the wound healing in less than 2 months. To the best of our knowledge, successful treatment of diabetic ulcers with AgNPs, discovered by our group, for the first time was described in our previous work [16]. This work is the second work of series of publications of our group dedicated to clinical cases of rapid wound healing of diabetic foot ulcers treated with AgNPs. It has been extensively reported the use of AgNPs for healing a wide spectrum of wounds including different types of ulcers. However, its study for the successful treatment of diabetic foot ulcers in patients has never been explored before our two publications (our previous article [16] and this work). Therefore, the results of our series of works will permit to include diabetic ulcers type, characterized by high extremity amputation risk, to this spectrum.

5. Acknowledgements

The authors wish to thank the funding through the International Network of

Bionanotechnology with impact in Biomedicine, Food and Biosafety (CONACYT project No. 279889) and to the CONACYT project No. 269071. This work was also supported by DGAPA PAPIIT-UNAM IT200114 project. Authors wish to thank Dr. Oxana Martyniuk and Sr. Francisco Ruiz Medina for their technical support. Authors acknowledge the medical support given by Carmen Enriques Enriques, Willfred Cárdenas Acosta, Michel Natay Peraza Perales, Alejandra Rembao Hernández and Nora Inés Carricury Chequer. We are grateful to Dr. Leonel Cota (CNyN-UNAM) for the studentships given through the CONACYT-SNI 3 researcher fund. Argovit AgNPs were kindly donated by Professor Dr. Vasily Burmistrov from the Scientific and Production Center Vector-Vita (Russia).

Referencias

- [1] J. P. Hernández-Ávila, Mauricio Gutiérrez and N. Reynoso-Noverón, "Diabetes mellitus en México. El estado de la epidemia," *Salud Pública de México*, vol. 55, no. 2, p. 129-S136., 2013. <https://doi.org/10.21149/spm.v55s2.5108>
- [2] S. Lopez-Antuñano and F. J. López- Antuñano, "Disponible en: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1064_0310," *Salud Publica Mex.*, vol. 40, no. 4, pp. 281-292, 1998. <https://doi.org/10.1590/S0036-36341998000300010>
- [3] M. S. Bader, "Diabetic foot infection.," *Am. Fam. Physician*, vol. 78, no. 1, pp. 71-9, 2008. <https://www.aafp.org/afp/2008/0701/p71.html>
- [4] E. J. Boyko, J. H. Ahroni, V. Cohen, K. M. Nelson, and P. J. Heagerty, "Prediction of diabetic foot ulcer occurrence using commonly available clinical information: the Seattle Diabetic Foot Study.," *Diabetes Care*, vol. 29, no. 6, pp. 1202-7, Jun. 2006. <https://doi.org/10.2337/dc05-2031>
- [5] J. Apelqvist and J. Larsson, "What is the most effective way to reduce incidence of amputation in the diabetic foot?," *Diabetes. Metab. Res. Rev.*, vol. 16 Suppl 1, pp. S75- 83, Jan. [https://doi.org/10.1002/1520-7560\(200009/10\)16:1+<::AID-DMRR139>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1520-7560(200009/10)16:1+<::AID-DMRR139>3.0.CO;2-8)
- [6] I. Uckay, K. Gariani, Z. Pataky, and B. A. Lipsky, "Diabetic foot infections: State-of- the-art," *Diabetes, Obes.*



Metab., vol. 16, no. 4, pp. 305-316, 2014.
<https://doi.org/10.1111/dom.12190>

[7] W. J. Jeffcoate and K. G. Harding, "Diabetic foot ulcers," *Lancet*, vol. 361, no. 9368, pp. 1545-1551, May 2003.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(03\)13169-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(03)13169-8)

[8] T. J. Boffeli, "Partial Foot Amputations for Salvage of the Diabetic Lower Extremity," *Clin. Pod. Med. Surg.*, vol. 31, pp. 103-126, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.cpm.2013.09.005>

[9] D. D. A. Martinez-Gomez, C. Ramirez- Almagro, A. Campillo-Soto, G. Morales- Cuenca, J. Pagan-Ortiz, and J. L. Aguayo- Albasini, "Infecciones del pie diabético. Prevalencia de los distintos microorganismos y sensibilidad a los antimicrobianos," *Enferm. Infecc. Microbiol. Clin.*, vol. 27, no. 6, pp. 317-321, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.eimc.2008.07.004>

[10] B. S. Atiyeh, M. Costagliola, S. N. Hayek, and S. A. Dibo, "Effect of silver on burn wound infection control and healing: Review of the literature," *Burns*, vol. 33, no. 2, pp. 139-148, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2006.06.010>

[11] S. Krol, R. Ellis-Behnke, and P. Marchetti, "Nanomedicine for treatment of diabetes in an aging population: State-of-the-art and future developments," *Maturitas*, vol. 73, no. 1, pp. 61-67, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2011.12.004>

[12] H. H. Lara, N. V. Ayala-Núñez, L. del C. Ixtepan Turrent, and C. Rodríguez Padilla, "Bactericidal effect of silver nanoparticles against multidrug-resistant bacteria," *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 26, no. 4, pp. 615-621, Oct. 2009. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0211-3>

[13] T. Gunasekaran, T. Nigusse, and M. D. Dhanaraju, "Silver nanoparticles as real topical bullets for wound healing," *Journal of the American College of Clinical*

Wound Specialists, vol. 3, no. 4. pp. 82-96, Dec- 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.jcws.2012.05.001>

[14] B. S. Anisha, R. Biswas, K. P. Chennazhi, and R. Jayakumar, "Chitosan-hyaluronic acid/nano silver composite sponges for drug resistant bacteria infected diabetic wounds," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 62, pp. 310-320, Nov. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.09.011>

[15] J. Tian, K. K. Y. Wong, C. M. Ho, C. N. Lok, W. Y. Yu, C. M. Che, J. F. Chiu, and P. K. H. Tam, "Topical delivery of silver nanoparticles promotes wound healing," *ChemMedChem*, vol. 2, no. 1, pp. 129-136, Jan. 2007.
<https://doi.org/10.1002/cmdc.200600171>

[16] C. A Almonaci H., K. Juárez-Moreno, M. E. Castañeda-Juárez, H. Almanza-Reyes, A. Pestryakov and N. Bogdanchikova "Silver nanoparticles for the rapid healing of diabetic foot ulcers.", *International Journal of Medical Nano Research*, vol. 4, no 1, pp. 1-6, 2017.
<https://doi.org/10.23937/2378-3664/1410019>

[17] B. Borrego, G. Lorenzo, J. D. Mota-Morales, H. Almanza-Reyes, F. Mateos, E. López-Gil, N. de la Losa, V. A. Burmistrov, A. N. Pestryakov, A. Brun, and N. Bogdanchikova, "Potential application of silver nanoparticles to control the infectivity of rift valley fever virus in vitro and in vivo.," *Nanomedicine*, vol. 12, no. 5, pp. 1185-1192, Mar. 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.nano.2016.01.021>

[18] K. Juarez-Moreno, E. B. Gonzalez, N. Girón-Vazquez, A. Chávez, J. D. M. Morales, L. L. Perez-Mozqueda, M. R. Garcia-Garcia, A. Pestryakov, and N. Bogdanchikova, "Comparison of cytotoxicity and genotoxicity effects of silver nanoparticles on human cervix and breast cancer cell lines," *Hum. Exp. Toxicol.*, vol. 36, no. 9, pp. 931-948, 2016.
<https://doi.org/10.1177/0960327116675206>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)



Construcción de una bobina de Tesla de estado sólido

Construction of a solid-state Tesla coil

Orendain Castro Sergio¹, Hernández Maldonado Alberto¹, Murillo Bracamontes Eduardo²

¹Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California. Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México.

²Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México. Ensenada Baja California, México

Autor de correspondencia: Alberto Hernández Maldonado, Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California. Unidad Valle de las Palmas, Tijuana, Baja California, México. E- mail: hernandez.alberto@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0002-9768-4060

Recibido: 02 de Julio del 2017 **Aceptado:** 07 de Noviembre del 2018 **Publicado:** 30 de Enero del 2019

Resumen. - Se realiza un estudio tanto teórico como experimental de los circuitos resonantes aplicados a la transmisión y recepción de energía eléctrica inalámbrica. Se construye una bobina de Tesla de estado sólido para lo cual, se calcula la frecuencia de resonancia y el voltaje máximo que se genera al tener una carga en la punta de la bobina secundaria. Mediante un receptor de ondas electromagnéticas diseñado para resonar a la misma frecuencia de la bobina de Tesla, se mide el voltaje emitido por el secundario. Mediante un microcontrolador PSoC, se despliega en una pantalla LCD para medir el alcance, la frecuencia, la potencia y el voltaje efectivo del secundario.

Palabras clave: Frecuencias resonantes; Bobina de Tesla.

Abstract. - A theoretical and experimental study of the resonant circuits applied to the transmission and reception of wireless electrical energy is carried out. A solid-state Tesla coil is constructed, for which the resonance frequency and the maximum voltage generated by having a load at the top of the secondary coil are calculated. By means of an electromagnetic wave receiver designed to resonate at the same frequency of the Tesla coil, the voltage emitted by the secondary is measured. Using a PSoC microcontroller, it is displayed on an LCD screen to measure the range, frequency, power and effective voltage of the secondary.

Keywords: Resonant frequency; Tesla coil.



1. Introducción

La transferencia de energía mediante inducción magnética a través de ondas de radio fue un problema que se planteó Nikola Tesla (1856-1943) a principio del siglo pasado [1]. Él abordó dicho problema mediante un sistema de distribución de electricidad a largas distancias, logrando éxitos parciales.

Recientemente, investigadores del Massachusetts Institute of Technology (MIT) retomaron el problema. El principio de operación de esta tecnología se fundamenta en técnicas de inducción magnética mejoradas. En sus experimentos lograron transferir electricidad por vía inalámbrica y encender una bombilla de 60 W, ubicada a 2 m de distancia y con una eficiencia del 40% [2].

En el presente trabajo se analizan teórica y experimentalmente circuitos resonantes aplicados a la transmisión y recepción de energía eléctrica inalámbrica. Se construye una bobina de Tesla de estado sólido y se calcula la frecuencia de resonancia y el voltaje máximo en la punta de la bobina secundaria. Diseñamos un receptor de ondas electromagnéticas para medir el voltaje y alcance emitido por dicha bobina secundaria.

2. Fundamentos de circuitos resonantes

En el presente apartado se presentan los conceptos fundamentales y ecuaciones básicas que servirán de apoyo para entender que son y en qué consisten los circuitos resonantes.

2.1. La fórmula de Wheeler

La fórmula de Wheeler permite el cálculo de la inductancia en bobinas con núcleo de aire [3]. Para calcular la inductancia de una bobina habiendo realizado las mediciones experimentales de dicho elemento, se utiliza la ec. (1).

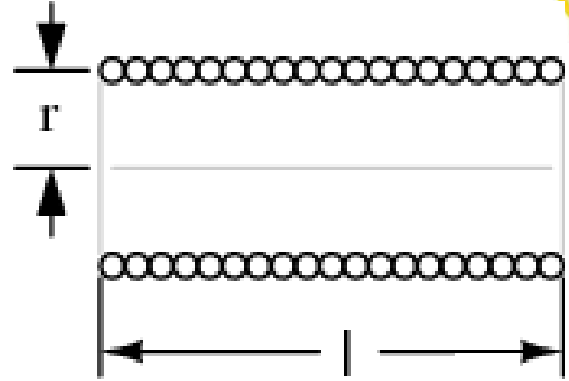


Figura 1. Modelo físico de una bobina.

$$L = \frac{0.394 r^2 N^2}{9 r + 10l} \tag{1}$$

2.2. Reactancia capacitiva

La reactancia capacitiva es la resistencia que ofrece un capacitor al paso de corriente alterna. La expresión que define el comportamiento de la reactancia capacitiva es la siguiente [4].

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \tag{2}$$

2.3. Reactancia inductiva

Se denomina reactancia inductiva a la resistencia que opone un inductor al paso de la corriente alterna, dicha reactancia se representa por X_L , como lo muestra la siguiente expresión. [4].

$$X_L = \omega L \tag{3}$$

2.4. La frecuencia de resonancia

La impedancia es una medida de oposición que presenta un circuito a la corriente alterna. La ecuación que define la impedancia Z, se muestra a continuación,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \tag{4}$$

Sustituyendo las ecuaciones (2) y (3) en la ec. (4), obtenemos el comportamiento de la impedancia Z para diferentes frecuencias de la



fem aplicada.

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (5)$$

La impedancia varía con la frecuencia ω , y su valor mínimo se obtiene cuando las reactivas X_L y X_C son iguales, como se puede ver en la ec. (6), resultando

$$Z = R \quad (6)$$

En la ec. (5) se tiene una diferencia de reactivas inductiva y capacitiva en función de la frecuencia. De dicha diferencia resulta,

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (7)$$

De donde resulta,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (8)$$

Donde ω_0 corresponde a la llamada frecuencia de resonancia. Definiendo $\omega_0 = F_0$, tenemos la frecuencia de resonancia en Hertz.

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (9)$$

3. Bobina de Tesla de estado sólido

En esta sección se presentan los resultados teóricos, las simulaciones e imágenes fotográficas tomadas al momento de realizar la bobina de Tesla.

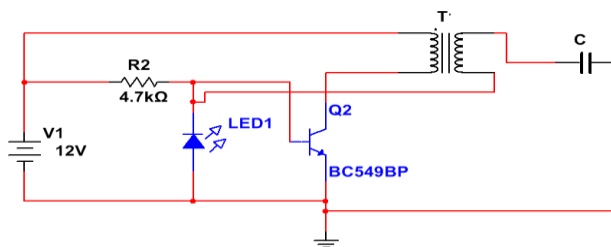


Figura 2. Diagrama de la bobina de Tesla de estado sólido.

El funcionamiento del circuito de la fig. (2), se basa en que el transistor Q2 actúa como un interruptor, el cual hará que actúe como un generador de funciones de alta frecuencia,

convirtiendo a la bobina ideal T en un circuito RLC, la cual se va a sintonizar a una frecuencia de resonancia que será la del transistor.

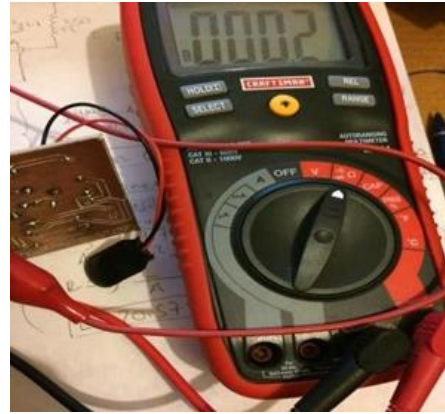


Figura 3. Medición de la resistencia de la bobina primaria

Una vez conociendo el valor de la resistencia, el cual corresponde a 0.2Ω , y sabiendo que el alambre es de estaño, se puede calcular la resistividad. La ecuación que define la resistividad de un conductor es,

$$l = \frac{RA}{\rho} = \frac{0.2\Omega (3.2 \times 10^{-7} m^2)}{11.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m} = 0.556 m$$

$$h_1 = d_{AA} N$$

3.1. Cálculos de la bobina primaria

A continuación, se muestran los valores correspondientes a los materiales utilizados para la elaboración de la bobina primaria.

$$\begin{aligned} \text{Palambre de estaño} &= 11.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \\ D_{\text{alambre}} &= 0.6438 \text{ mm} \\ d_{AA} &= 0.132 \text{ cm.} \end{aligned}$$

De donde resulta que el área del alambre es,

$$A_1 = \pi (0.3219 \text{ mm})^2 = 0.32 \text{ mm}^2.$$

Con el apoyo del multímetro, podemos conocer el valor de la resistencia del embobinado, (ver fig. (3)). Para calcular la altura h_1 de la bobina primaria, es necesario multiplicar el diámetro del alambre con aislante, por el número de



vueltas, el cual, en este caso, corresponde a 5 vueltas,

$$h_1 = 0.132 \text{ cm (5)} = 0.66 \text{ cm}$$

Para calcular la inductancia de la bobina, se debe conocer el radio r del núcleo, dando como resultado 1.27 cm. Teniendo N , r y h_1 , se puede calcular la inductancia utilizando la fórmula de Wheeler, (ver ec. (1).

$$L_1 = 0.88 \mu\text{H}$$

Para comprobar dicho valor de la inductancia, se procedió a medir la bobina primaria con el LCR.



Figura 4. Medición de la inductancia de la bobina primaria.

Posteriormente, se procedió a medir la capacitancia del circuito RLC interno de la bobina, dando un resultado de 2.73 nF, como se muestra en la fig. (5).



Figura 5. Medición de la capacitancia parasita.

Si se tiene la inductancia y la capacitancia del circuito RLC interno de la bobina, se puede calcular la frecuencia F_0 de resonancia de la bobina primaria. Esta bobina sufre una resonancia por sí misma, esto es, la bobina misma tiene implícitamente una capacitancia cuando se somete a una alta frecuencia. A continuación, se efectúa el cálculo de la frecuencia de dicha resonancia.

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.88 \mu\text{H})(2.73 \text{ nF})}} = 3.247 \text{ MHz}$$

3.2 Cálculos de la bobina secundaria

La bobina secundaria tiene un radio de 0.1275 mm, con el cual podemos calcular el área del alambre de dicha bobina.

$$A = \pi(0.1275 \text{ mm})^2 = 0.510 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

La resistencia de dicho alambre se obtiene usando el dispositivo LCR, como se muestra en la fig. (6)



Figura 6. Medición de la resistencia de la bobina secundaria.

Como se puede observar en la fig. (6), la resistencia de la bobina es de 6.0506 Ω . Con este y los demás datos se encuentra que la longitud del alambre es,



$$l = \frac{RA}{\rho} = \frac{6.0506\Omega(0.510 \times 10^{-7} m^2)}{1.71 \times 10^{-8} \Omega \cdot m} = 18.04 m$$

La altura de la bobina secundaria fue medida usando un vernier. Dicha altura es: $h_2 = 5.8$ cm. Por otro lado, el radio del embobinado correspondiente a 212 vueltas es: $r = 1.27$ cm. Con lo anterior podemos calcular la inductancia L_2 de la bobina secundaria, utilizando la fórmula de Wheeler, ver ec. (1).

$$L_2 = 411.36 \mu H$$

Para comprobar este valor de inductancia, utilizamos el dispositivo LCR, como se muestra en la fig. (7).



Figura 7. Inductancia de la bobina secundaria.

Para calcular la capacitancia parasita de la bobina secundaria C_2 , despejamos C de la ec. (9), y sustituimos datos.

$$C_2 = \frac{1}{4\pi^2(3.247 MHz)^2(411.36 \mu H)} = 5.8405 pF$$

3.3. Cálculos de la energía potencial y el voltaje

La bobina secundaria presenta una capacitancia a tierra, además de la capacitancia que hay entre las espiras que la conforman. Para determinar la capacitancia producida por la

bobina secundaria, usamos el modelo de un solenoide cilíndrico, la denominada fórmula de Medhurst, la cual nos da la capacitancia por unidad de longitud C_{L2} [5]:

$$C_{L2} = \left(0.29 h_2 + 0.41 r + 1.94 \sqrt{\frac{r^3}{h_2}} \right) pF/in \quad (10)$$

Donde $r = 1.27$ cm corresponde al radio del núcleo, y $h_2 = 5.8$ cm a la altura de la bobina secundaria,

$$C_{L2} = 1.32 pF$$

La capacitancia real C_R de la bobina secundaria, sin colocarle ninguna carga en su punta que esta al aire, es la siguiente:

$$C_R = C_2 - C_{L2} = 5.8405 pF - 1.32 pF = 4.52 pF$$

Las capacitancias se restan de debido a la aplicación de la ley de Kirchhoff de voltajes, ya que éstas almacenan voltaje, y están conectadas en serie. Al momento de poner una carga en la punta de la bobina secundaria, habrá una descarga, por lo que la capacitancia va a disminuir, y el voltaje va a aumentar, como lo muestra la ec. (11).

La capacitancia por unidad de longitud C_D , al colocar una carga en la punta de la bobina secundaria, es [6]

$$C_D = 1.4 \left(1.2781 - \frac{d_2}{d_1} \right) \sqrt{\pi d_2 (d_1 - d_2)} pF/in \quad (11)$$

En donde d_2 es el diámetro del alambre de la bobina secundaria, y d_1 es el diámetro del núcleo del embobinado, como se muestra en la fig. (3.7).

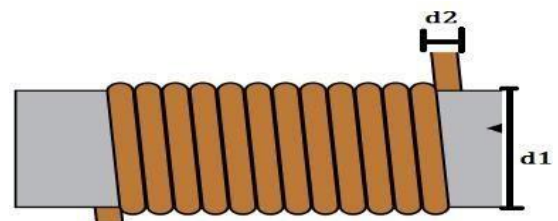


Figura 8. Esquema del diámetro del alambre y núcleo.



Anteriormente se realizaron las mediciones y cálculos correspondientes a d_1 y d_2 . Para calcular C_D utilizamos la ec. (11).

$$C_D = 0.31 \text{ pF}$$

Para conocer la energía almacenada en la bobina secundaria, se debe conocer el voltaje de entrada a la bobina primaria, dicho voltaje es el del transistor. La medición correspondiente al voltaje del transistor se muestra en la fig. (8).

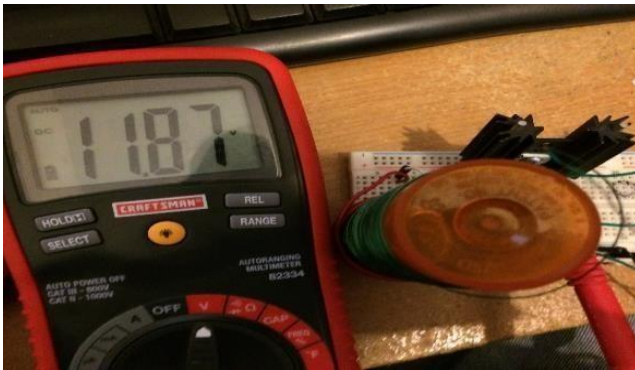


Figura 9. Medición del voltaje del transistor

Para calcular la energía almacenada en el capacitor primario, se utiliza la ecuación que define la energía con respecto al voltaje.

$$E_c = \frac{1}{2} C_1 V_c^2 = \frac{1}{2} (2.716 \times 10^{-9} \text{ F}) (11.87 \text{ V})^2 = 1.91 \times 10^{-7} \text{ J}$$

Si se asume que no hay pérdida de energía en la

transferencia de la misma, entre la bobina primaria y secundaria, entonces se tiene que,

$$E_{CP} = E_{CS}$$

Para calcular el voltaje V_{oc} en la punta de la bobina secundaria cuando se coloca una carga, utilizamos la siguiente ecuación.

$$E_{CS} = \frac{1}{2} C_D V_{oc}^2$$

$$V_{oc} = \sqrt{\frac{2E_{CS}}{C_D}} = \sqrt{\frac{2(1.91 \times 10^{-7} \text{ J})}{0.31 \text{ pF}}} = 1110.7 \text{ V}$$

La capacitancia de la bobina secundaria disminuye hasta un valor de 0.31 pF, conforme se aproxima la carga.

Para calcular el voltaje de la bobina secundaria sin carga, utilizamos la siguiente ecuación

$$V_{OR} = \sqrt{\frac{2E_{CS}}{C_R}} = \sqrt{\frac{2(1.91 \times 10^{-7} \text{ J})}{4.52 \text{ pF}}} = 290.7 \text{ V}$$

3.4 Frecuencia de resonancia como función del voltaje.

En esta sección se presentarán las simulaciones realizadas, para comprobar nuestros resultados teóricos. Para la bobina secundaria de la bobina de Tesla, aplicando una carga, se tiene lo siguiente: (ver fig.3.9).

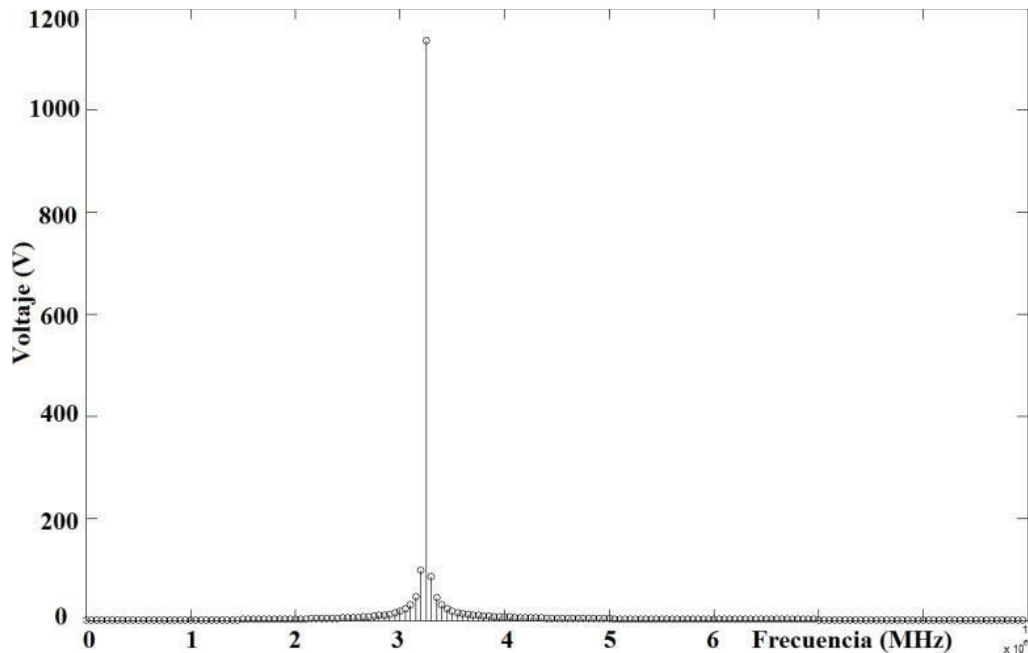


Figura 10. V_{OC} con respecto a F_0 , en donde V_{OC} corresponde a un valor aproximado de 1110 V y F_0 a un valor de 3.24 MHz respectivamente.

Para la bobina secundaria de la bobina de Tesla, sin aplicar una carga tenemos,

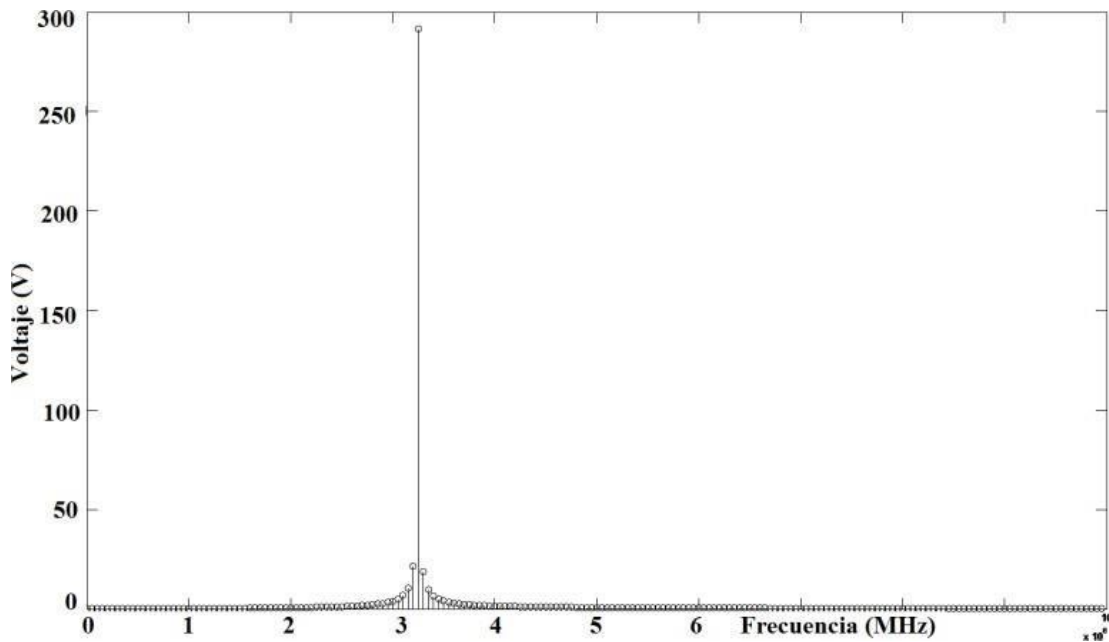


Figura 11. V_{OR} con respecto a F_0 , en donde V_{OR} corresponde a un valor aproximado de 290 V y F_0 a un valor de 3.24 MHz respectivamente.

4. Receptor de ondas electromagnéticas

En esta sección se presentará un receptor de ondas electromagnéticas (OEM), diseñado para

medir la frecuencia de resonancia, el voltaje, y la potencia de la bobina de tesla. La importancia de dicho receptor, es que puede medir la distancia del transmisor y el voltaje



efectivo de dicha señal, cosa que es imposible hacer con un analizador de espectros.

4.1 Comparación de los valores medidos mediante un analizador de espectros y el receptor de ondas electromagnéticas.

A continuación, se muestra la medición de la frecuencia y la potencia de la bobina de Tesla, utilizando el analizador de espectros.

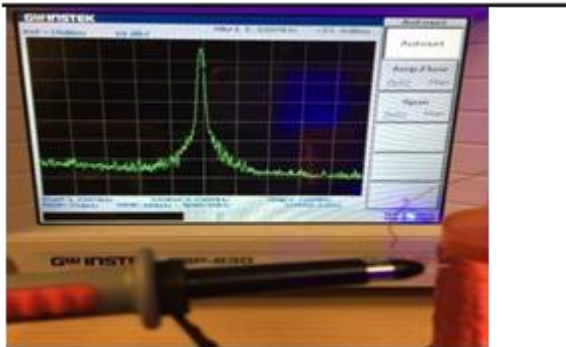


Figura 12. Medición con el analizador de espectros.

Como se observa en la fig. (12), la medición de la frecuencia de resonancia es de 3.238 MHz, con una Atenuación de la amplitud de -22.6 dbm (decibeles metro). Concordando aproximadamente con los datos desplegados de la pantalla LCD en el receptor, como se muestra en la fig. (13).

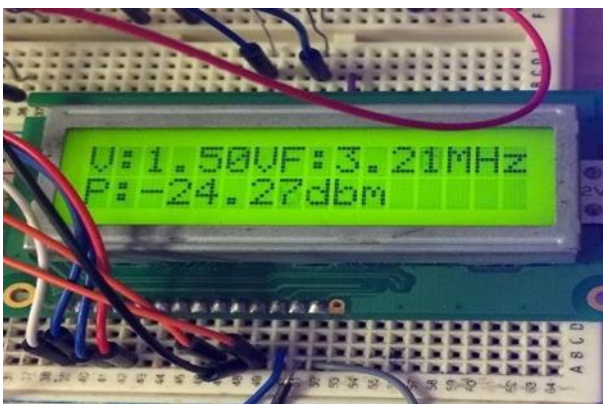


Figura 13. Medición de los valores de la frecuencia y potencia de la bobina de Tesla usando el detector de OEM.

4.2. Relación entre el voltaje y su alcance en la bobina de Tesla.

Mediante el analizador de espectros se comprueba que los resultados teóricos de la frecuencia de resonancia y la potencia de la bobina de Tesla concuerdan con las mediciones experimentales. Con la finalidad de conocer el voltaje efectivo, la frecuencia y la potencia de la bobina de Tesla se instaló un microcontrolador en el receptor para visualizar dichos parámetros en una pantalla LCD.

5. Conclusiones

Se elaboraron los cálculos analíticos necesarios para su construcción y diseño de una bobina de Tesla de estado sólido. Para su elaboración se utilizó la configuración de emisor común con un transistor para que actuara como generador de funciones. Debido a que el funcionamiento de la bobina de Tesla se basa en el análisis intrínseco de bobinas y capacitores, fue necesario realizar una medición de la capacitancia parasita, formada entre las espiras de la bobina secundaria. Dicha capacitancia fue medida en altas frecuencias.



Referencias

- [1] Pozar D. “*Microwave Engineering*”, John Wiley & Sons, Inc., E.U.A. 2005. <https://www.wiley.com/en-gb/Microwave+Engineering%2C+4th+Edition-p-9780470631553>
- [2] Raza M. and Haque M. “The Witricity: Revolution in power transmission technology.” *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol. 4, 2013. <https://www.ijser.org/researchpaper/The-Witricity-Revolution-in-Power-Transmission-Technology.pdf>
- [3] Wheeler H. "Formulas for the skin effect", *Proceedings of the I. R. E.* pp. 412-424, 1942. <https://doi.org/10.1109/JRPROC.1942.232015>
- [4] Ohanian H. and Market J. “*Física para ingeniería y ciencias*”, McGraw-Hill, México, 2009. <https://www.mheducation.com.mx/fisica-para-ingenieria-y-ciencias-9789701067444-latam>
- [5] Knight D. “*The self-resonance and self-capacitance of solenoid coils: applicable theory, models and calculation methods*”, 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1472.0887>
- [6] Rana M. and Pandit A. “Design and Construction of a Tesla Transformer by using Microwave Oven Transfer for Experimentation: applicable theory, models and calculation methods”, 2014. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/ISDE/article/view/18230>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)



Desarrollo de un sistema mecatrónico para robot humanoide que permita emular el movimiento del cuello de los seres humanos

Development of a mechatronic system for humanoid robot that allows to emulate the movement of the neck of human beings

López Cortés Francisco José ¹, Vergara Limón Sergio ¹, Vargas Treviño María Aurora Diozcora ¹, Palomino Merino Amparo Dora ¹, Pinto Avedaño David Eduardo ², Vilariño Ayala Darnes ²

¹Facultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio y 18 Sur S/N C.U. Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Puebla, México.

²Facultad de Ciencias de la Computación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av. San Claudio y 14 Sur S/N C.U. Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Puebla, México.

Autor de correspondencia: Francisco José López Cortés, Facultad de Ciencias de la Electrónica, Maestría en Ciencias de la Electrónica opción Automatización, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio y 18 Sur S/N C.U. Col. Jardines de San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Puebla, México. E-mail: lopcorp.z@gmail.com. ORCID: 0000-0002-7427-1386.

Recibido: 01 de Julio del 2018 **Aceptado:** 20 de Diciembre del 2018 **Publicado:** 10 de Febrero del 2019

Resumen. - *En el presente trabajo se muestra el diseño de un sistema mecatrónico, el cual emula los movimientos del cuello humano, ya que sostendrá la cabeza de un robot humanoide (Arthur) desarrollado por la empresa Hanson Robotics. El diseño mecánico se basa en un robot esférico de 3 grados de libertad (3-GDL), se desarrolla el modelo dinámico a través de las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange. La etapa de control es una tarjeta de desarrollo FPGA (arreglos de compuertas programables en campo) de la familia Cyclone IV, la etapa de potencia se basa en transistores BJT, se implementa el controlador Tangente hiperbólico y una interfaz de comunicación WiFi para configurar el robot desde una PC con ayuda del software Labview. Como resultado se muestra la integración del sistema mecatrónico, la interfaz desarrollada junto con la comunicación FPGA-PC y control de posición. El trabajo futuro será la implementación del sistema en el robot humanoide.*

Palabras clave: Sistema Mecatrónico; Robot Humanoide; Modelo Dinámico; FPGA; WiFi.

Abstract. - *The present work shows the design of a mechatronic system, which emulates the movements of the human neck, as it will support the head of a humanoid robot (Arthur) developed by Hanson Robotics. The mechanical design is based on a spherical robot of 3 degrees of freedom (3-GDL), the dynamic model is developed through the Euler-Lagrange equations of motion. The control stage is a FPGA (Field Programmable Gate Arrays) development board, the power stage is based on BJT transistors, the hyperbolic tangent controller and a WiFi communication interface are implemented to configure the robot From a PC with the help of Labview software. As a result, the integration of the mechatronic system, the interface developed together with the FPGA-PC communication and position control, is shown. Future work will be the implementation of the system in the humanoid robot.*

Keywords: Mechatronic System; Humanoid Robot; Dynamic Model; FPGA; WiFi.



1. Introducción

Los avances de la robótica en la actualidad no se limitan a entornos industriales, también se han revolucionado los semblantes y las funciones de los robots, logrando introducirlos a un entorno social, dando pie a los robots de servicio, denominados humanoides por su apariencia, los cuales realizarán tareas en beneficio de la sociedad, labores cotidianas o con fines terapéuticos, por ejemplo, la rehabilitación de niños con problemas de lenguaje, la detección de desórdenes de comportamiento en jóvenes y en terapia ocupacional geriátrica. Se han desarrollado robots humanoides capaces de replicar las expresiones faciales del ser humano y lograr entablar una conversación, tal es el caso de Arthur, desarrollado por la empresa Hanson Robotics [1].

Uno de los aspectos importantes para que la interacción robot-humano sea de forma natural, se da en los movimientos o acciones que producimos al hablar. El cuello es una de las áreas más complejas del cuerpo humano, puede realizar un gran número de movimientos, los más básicos son flexión, extensión, inclinación y rotación, cada uno implica la participación de estructuras diferentes, que facilitan, controlan y limitan el movimiento [2].

2. Metodología

El sistema mecatrónico presentado en este trabajo se conforma de una interfaz desarrollada en el software Labview, donde se utiliza la comunicación WiFi para la programación, inicio-paro y extracción de datos del sistema mecatrónico generados por la acción de control del robot esférico de 3 GDL. El sistema digital está basado en un microprocesador implementado en un FPGA Cyclone IV de la familia Altera, el cual se desarrolló en la facultad de ciencias de la electrónica (FCE) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), tiene la función de obtener los datos de posición de cada grado de libertad, con ayuda de los sensores del sistema

mecatrónico (encoders de cuadratura), posteriormente realiza la acción de control a través del controlador tangente hiperbólico y genera la señal para los actuadores del sistema (motores CD), que en este caso es una señal PWM, el sistema digital también cuenta con una interfaz WiFi. La etapa de potencia está formada por trespunte H, basados en transistores BJT, los cuales entregan la potencia requerida por los actuadores para generar los movimientos del sistema. Se muestra en la figura 1 el diagrama general del sistema mecatrónico.

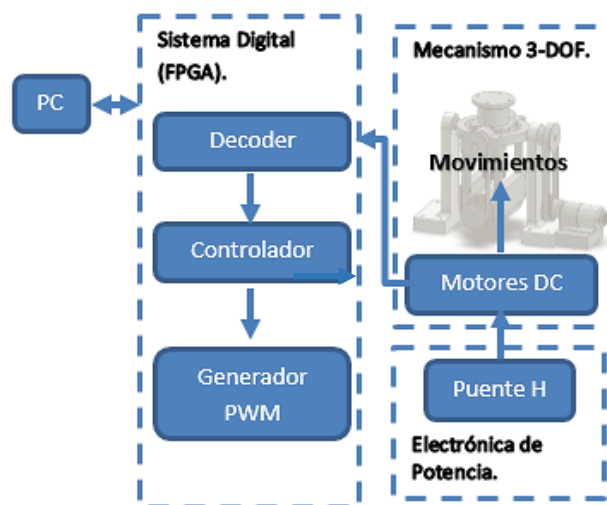


Figura 1. Diagrama general del sistema mecatrónico.

3. Diseño Mecánico

El diseño mecánico que se muestra en la figura 2 se basa en un robot esférico de 3 grados de libertad (3-GDL) provisto con contrapesos para reducir la distancia del centro de masa de la cabeza al punto de rotación del mecanismo, esto minimiza el torque demandado por los actuadores ya que las fuerzas centrípetas y de coriolis tienden a cero cuando el centro de masa se encuentra sobre el punto donde se intersectan los ejes de rotación.

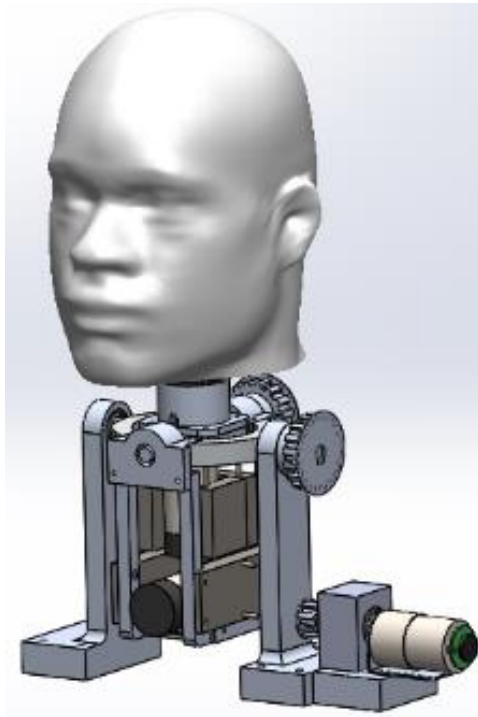


Figura 2. Ensamble de la estructura mecánica acoplada con la cabeza del robot humanoide.

4. Modelo Dinámico

Para desarrollar el modelo dinámico se utilizaron las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange, por tanto, se definen los parámetros Denavit-Hartenberg como se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros D-H.

| Eslabón | l_i | α_i | d_i/β_i | q_i |
|---------|-------|------------|---------------|------------|
| 1 | l_1 | 90° | 0 | q_1 |
| 2 | l_2 | 0 | 0 | q_2 |
| 2a | 0 | 0 | 0 | 90° |
| 2b | 0 | 90° | 0 | 0 |
| 2c | 0 | 0 | β_1 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | β_2 | q_3 |
| 3a | 0 | 0 | 0 | 90° |
| 4 | l_3 | 0 | 0 | 0 |

La ecuación (1) expresa el modelo dinámico del robot esférico de 3 GDL en su forma compacta y con notación utilizada en el área de robótica [3].

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

Donde:

τ = Vector de par aplicado.

$q \in \mathbb{R}^n$ = Vector de coordenadas generalizadas

$\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ = Vector de velocidades articulares.

$\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$ = Vector de aceleraciones articulares.

$M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ = Matriz de inercia.

$C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ = Matriz de fuerzas centrípetas y de coriolis.

$g(q) \in \mathbb{R}^n$ = Vector de par gravitacional.

5. Electrónica de Control y Potencia

La etapa de control consta de un microprocesador, donde se realiza la programación en lenguaje ensamblador de la acción de control, el código de programa se almacena en una memoria ROM y también se cuenta con una memoria RAM para almacenar variables y datos calculados por el mismo, además cuenta con periféricos de entrada, que son decodificadores para la adquisición de datos de los encoders de cuadratura, y registros donde se almacenan los datos enviados desde la interfaz gráfica de la PC, tanto la programación como la comunicación de datos es realizada mediante un módulo externo WiFi, los periféricos de salida son generadores de señal PWM, lo anterior fue implementado en un FPGA Cyclone 4 y se realizó el firmware en lenguaje AHDL. Se diseñó un puente H para la etapa de potencia de cada motor, las señales de control solo pueden entregar hasta 1mA a 3.3v, por este motivo se requiere un circuito con transistores BJT en configuración Darlington.

6. Resultados

Se observa en la figura 3 la interfaz gráfica desarrollada en el software Labview, en la cual se cargó el programa del microprocesador y se proporcionó la posición y ganancias para cada grado de libertad, el módulo WiFi genera una conexión punto a punto con la PC, fue necesario que la comunicación se realizara por protocolo TCP/IP desde la interfaz gráfica.



Figura 3. Interfaz gráfica de control, la cual se encarga de programar el micro controlador, enviar los parámetros deseados y adquirir los datos calculados.

En la figura 4 se muestra la integración del sistema mecatrónico, donde se observa la estructura mecánica, etapa de control y la etapa de potencia, conectadas entre sí mediante un arnés de 12 cables. La etapa de control y potencia se integraron en un clúster, así, la electrónica utilizada se presenta de manera compacta.

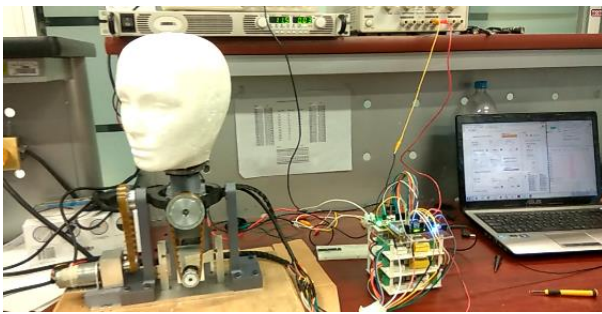


Figura 4. Integración del sistema mecatrónico, conectado y en comunicación con la PC.

El control de posición se llevó a cabo con un controlador tangente hiperbólico. En la figura 5 se ilustra la respuesta del controlador al simular el modelo dinámico obtenido previamente, las posiciones articulares son: 20° , 10° y 10° (grados) para q_1 , q_2 y q_3 respectivamente, utilizando ganancias proporcional (K_p) de 0.45 y derivativa (K_v) de 0.35, cabe resaltar que este sistema debe de compensar el peso de 3.32 kg de la cabeza del robot humanoide, por tanto se observó que el comportamiento del torque calculado se determinaba por el par gravitacional en su mayoría, además se propone una aproximación de los parámetros físicos del robot para lograr realizar la simulación. Por tanto, se tiene un error

de posición para q_1 de 20.59° grados, para q_2 y q_3 se encontró un error de posición de 0.11° grados, en un tiempo de 1.5seg. de simulación.

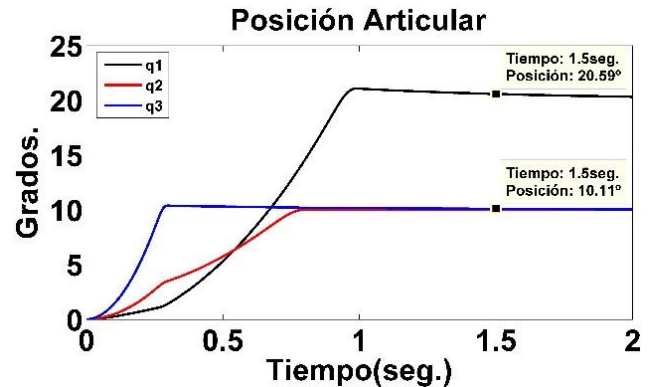


Figura 5. Simulación en Matlab del controlador tangente hiperbólico, con parámetros físicos aproximados.

Para realizar el experimento de control en el sistema físico, se emulo la cabeza del robot humanoide con un peso de 3.32kg, se consideraron los parámetros físicos propuestos en la simulación para efectos de comparación. Se obtuvieron los datos calculados y se graficaron en el software Matlab, como se muestra en la figura 6, encontrando que, para las mismas posiciones deseadas y ganancias propuestas en la simulación, para q_1 en el tiempo 1.5seg se observa un error de 0.337° grados, para q_2 se tiene un error de posición de 0.162° grados y para q_3 el error de posición es de 0.3348° grados. Se aprecia que el comportamiento de q_1 es diferente a la simulación, debido a la estimación de los parámetros físicos, en este caso la acción de la fuerza de gravedad es mayor en esta articulación, y las ganancias propuestas necesitan ser mayores para que la acción de control se presente de manera suave y no genere el sobre impulso que se muestra en la gráfica. Se aprecia que los errores de posición son pequeños, pero tomando en cuenta la resolución de los encoders del sistema que es de 0.04285° grados, se tiene que el error de lectura en valor incremental del encoder para q_1 es de 7.864, para q_2 es de 3.78 y para q_3 se tiene un error de 7.813. Por tanto, se debe de realizar una prueba de estimación paramétrica, como lo puede ser mínimos cuadrados, para conocer de forma exacta los parámetros físicos del robot.

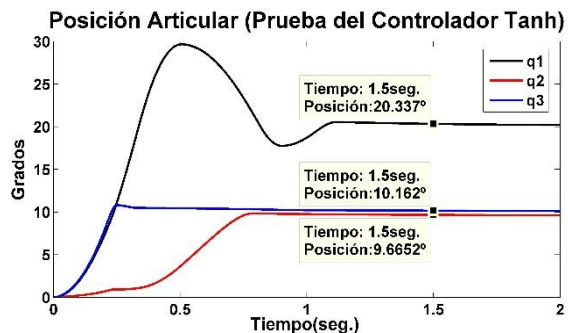


Figura 6. Control de posición del sistema mecatrónico, implementando en software un controlador tangente hiperbólico.

7. Conclusiones

Se logró diseñar una estructura mecánica que emule los movimientos del cuello de los seres humanos, que es de gran importancia para la interacción robot-humano. Se desarrolló una interfaz gráfica, la cual se comunica por protocolo WiFi a una computadora donde el usuario programa el micro controlador, proporciona la posición deseada y las ganancias para cada actuador, por último se realiza una comparación entre una simulación en Matlab y el control de posición del sistema, ambos con un controlador tangente hiperbólico, concluyendo que el modelo dinámico obtenido es de gran ayuda para el control del sistema real, ya que, por medio de este se obtuvo el par gravitacional, es decir, la

compensación de gravedad, aunque los parámetros físicos fueron aproximados, es una base sólida para obtener los parámetros reales con ayuda un algoritmo de identificación paramétrica. Como trabajo futuro se implementará el sistema mecatrónico en el robot humanoide.

Referencias

- [1] Hanson Robotics. (2016, 15 Marzo). Meet Arthur a Humanoid Robot (Hanson Robotic News). [Página web]. Disponible en: <http://hansonrobotics.com/slate-fr-blogger-meets-arthur-dld-conference/>
- [2] J. L. Guerra, Manual de fisioterapia (2a. ed.). Editorial El Manual Moderno, 2018. https://tienda.manualmoderno.com/manual-de-fisioterapia-9786074487107-9786074487190.html?SID=38b00ea117d111154a7fd6fe32c80c75&store%5B_data%5D%5Bstore_id%5D=2&store%5B_data%5D%5Bcode%5D=manual_moderno_mexico_mxn&store%5B_data%5D%5Bwebsite_id%5D=2&store%5B_data%5D%5Bgroup_id%5D=2&store%5B_data%5D%5Bname%5D=Manual+Moderno+M%C3%A9xico&store%5B_data%5D%5Bsort_order%5D=0&store%5B_data%5D%5Bis_active%5D=1
- [3] F. Cortés, “Robótica: Control de Robots Manipuladores”, Alfaomega Grupo Editor, 1era. Edición, México, 2011. <https://www.alfaomega.com.mx/default/robotica-control-de-robots-manipuladores-4645.html>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del lic

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)



Evaluation of cobalt nanoparticle deposited graphene oxide and carbon nanotube supports as supercapacitor electrodes

Evaluación del óxido de grafeno depositado en nanopartículas de cobalto y soportes de nanotubos de carbono como electrodos supercondensadores

Aguilar-Meza David Ricardo ¹, Salazar-Gastélum Moisés Israel^{1*}, Pérez-Sicairos Sergio ^{1,2}, Félix-Navarro Rosa María ², Gochi-Ponce Yadira ^{1,2*}

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tijuana, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Blvd. Industrial S/N. C. P. 22500. Tijuana, Baja California, México.

²Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tijuana, Centro de Graduados e Investigación en Química, Blvd. Industrial S/N. C. P. 22500. Tijuana, Baja California, México.

Autores de correspondencia: Moisés Israel Salazar Gastélum, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tijuana, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Blvd. Industrial S/N Tijuana, B. C. México, C. P. 22500. E-mail: moises.salazar@tectijuana.edu.mx. Yadira Gochi Ponce, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tijuana, Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Blvd. Industrial S/N Tijuana, B. C. México, C. P. 22500. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tijuana, Centro de Graduados e Investigación en Química, Blvd. Industrial S/N Tijuana, B. C. México, C. P. 22500. E-mail: yadira.gochi@tectijuana.edu.mx. ORCID: 0000-0002-1590-2432 .

Recibido: 15 de Agosto del 2018 **Aceptado:** 02 de Enero del 2019 **Publicado:** 15 de Febrero del 2019

Resumen. - Las nanopartículas de cobalto se depositaron en soportes de carbono, nanotubos de carbono de pared múltiple (CNT) y óxido de grafeno (GO), y se evaluaron como potenciales electrodos de supercondensadores. La estructura y la morfología de las nanopartículas de cobalto depositadas sobre los soportes de carbono se estudiaron mediante XRD, TGA y espectroscopía Raman. La voltametría cíclica se utilizó para medir la carga eléctrica del electrodo en función de los materiales y se calculó su capacitancia específica (Csp). El electrodo basado en GO mostró un Csp mayor que el electrodo CNT, lo cual se atribuye a un área de superficie mayor del soporte de carbono GO. Curiosamente, el depósito de nanopartículas de Co promovió una Csp mejorada en los soportes GO y en los CNT de pared múltiple.

Palabras clave: Supercondensador; Óxido de Grafeno; Nanotubos de Carbono; Nanopartículas de Cobalto.

Abstract. - Cobalt nanoparticles were deposited on multi-wall carbon nanotubes (CNT) and graphene oxide (GO) carbon supports and evaluated as a potential supercapacitor electrodes. The structure and morphology of the cobalt nanoparticles deposited on carbon supports were studied using XRD, TGA, and Raman spectroscopy. Cyclic voltammetry was used to measure the electrical charge of the electrode based on the materials and their specific capacitance (Csp) were calculated. GO based electrode showed a higher Csp than CNT electrode which is attributed to a larger surface area of the GO carbon support. Interestingly, the deposition of Co nanoparticles promoted an enhanced Csp in the both GO and multi-wall CNT supports.

Keywords: Supercapacitor; Graphene Oxide; Carbon Nanotubes; Cobalt Nanoparticles.



1. Introducción

Energy demand has always been a primary area of interest around the world and its claim has grown very fast in recent years. Considerable effort has been dedicated to the research and development of more efficient energy storage devices and systems [1].

The bulk of energy storage research has been focused on two types of electrochemical devices: batteries and capacitors. Batteries have low power density with higher energy density, while conventional capacitors exhibited high power but lower energy density. On the other hand, supercapacitors (SCs) are efficient devices that have exceeded the energy storage capacity with respect to conventional capacitors. The SCs have great advantages including their high-power density, long service life, wide operating temperature range, flexibility, and their ecofriendly nature. Some applications for these devices are in areas like consumption electronic, hybrid vehicles, and industrial power/energy managements [2]. However, SCs suffer from low energy density and high manufacturing cost.

Conventionally, the capacitive behavior can be classified into two types; (1) the double layer electric capacitance (EDLC) arising from electrostatic attraction between electrolyte and electrode surface; (2) the pseudo-capacitance associated with fast and reversible faradic reactions of the active species on the surface of the electrode.

One way to attain better performance for capacitors is to increase the capacitance (C). Capacitance is directly influenced by the dielectric constant of the electrolyte, (ϵ_r), the effective thickness of the double layer (d , separation between charges), the dielectric constant of the vacuum (ϵ_0) and the surface area (A):

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (1)$$

The use of nanomaterials such as graphene oxide

(GO) and multi-wall carbon nanotubes (CNT) can provide a synergistic effect on capacitance and thereby energy density and the deposition of nanoparticles is expected to increase this synergic effect. Typically, noble metal oxides such as RuO_2 have exhibited exceptional properties as pseudo-capacitor materials for capacitors. The high cost of Ru has thwarted its commercial acceptance as an electrode material in SCs and encouraged finding other cheaper materials with a similar capacitive behavior as RuO_2 [3]. Cobalt appears as a possibility to increase the energy storage by the phenomenon of pseudo-capacitance [reference needed]. We propose the use of GO and CNT modified deposited with Co nanoparticles in order to obtain a non-expensive and efficient material for SCs.

2. Methodology

In this work, GO was synthesized by Hummers modified method [4] and CNT were synthesized by spray pyrolysis [5]. Nanoparticles of cobalt were deposited on both carbonaceous supports by the method of reverse microemulsion [6].

2.1 Preparation of GO, CNT, Co/GO and Co/CNT

Hummers modified method consists of the exfoliation of graphite powder in strongly oxidizing media. 2 g of the natural graphite powder was added into a 250-mL beaker with 1 g of NaNO_3 . 46 mL of H_2SO_4 were subsequently added to the graphite powder mixture under stirring in an ice-bath. Then, 6 g of KMnO_4 was added slowly into the beaker while stirring and the temperature of the system was maintained at 20 °C using an ice-bath. After 5 min, the ice bath was removed and the system was heated (what temperature?) for 30 min followed by an addition of 92 mL of and the mixture was stirred for 15 min. Then, 80 mL of hot water at 60 °C and H_2O_2 aqueous solution (3 wt %) were added to the mixture until the bubbling disappeared. Finally, the system was centrifuged for 30 min, and the



residue was washed with warm water until the suspension was neutralized.

In spray pyrolysis, a quartz tube was placed inside of an oven at 850 °C while a solution of 20 mM of ferrocene in toluene was sprayed out by Ar flow at 20 psi. After the reaction was allowed to proceed for 30 min, the oven cooled down to room temperature with Ar flow. CNTs were functionalized by acidic solution of H₂SO₄:HNO₃ with a ratio 1:3 M.

The deposition of Co nanoparticles was performed by reverse microemulsion method which starts with the preparation of a microemulsion solution of isopropanol/CTAB/ H₂O (56 mL/2 g/4 mL). 40 mL of microemulsion solution were taken in order to disperse the support (either CNT or GO) under sonication. Then, the dispersion was placed in a round bottom flask under stirring at 60 °C. After 15 min, a mixture of 2 mL of aqueous solution containing 100 mM of sodium borohydride and 100 mM of sodium citrate was prepared and added with 10 mL of the above microemulsion solution. After 20 min, 12 mg of cobalt (II) chloride salt dispersed in 2 mL of H₂O was slowly added into the original 10 mL of microemulsion solution by sonication and the reaction vessel was kept at reflux for 90 min. Finally, the residue was filtered and washed with DI water, isopropanol, and ketone.

2.2 Characterization

The structure and morphology of nanocomposites were characterized by Raman spectroscopy, X-ray diffraction and thermogravimetric analysis. The electrochemical properties of nanomaterials and their correlation with the nanoparticles were investigated using a three-electrode cell using techniques such as cyclic voltammetry (CV) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Glassy carbon (GC) was used as working electrode (3 mm of diameter), Au wire was used as counter electrode, and Ag/AgCl/KCl sat was used as reference electrode.

3. Results and Discussions

TGA curves were used to understand the thermal decomposition behavior of the two different supports used in this study. CNT showed a thermal decomposition at 633 °C, while GO exhibited the thermal decomposition at 188 °C. CNT-F (What is CNT-F? should explain that first) showed a thermal behavior similar to CNT but showed decomposition at 320 °C, due to desorption of oxygen functional groups. Besides, the metal loading of both Co/CNT and Co/GO was estimated by TGA analysis as 12% and 19% respectively.

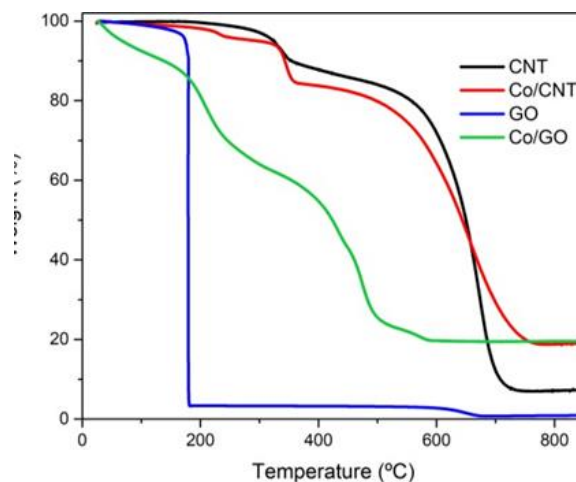


Figure 1. TGA curves of the synthesized materials.

Raman spectroscopy is useful for studying order and defects in crystal structure and is often employed to characterize carbonaceous materials [reference needed]. The G band is common for all sp² carbon forms and it arises from the C-C bond stretch. This band is formed from first order Raman scattering and the D band is associated with disordered structural defects [7]. The ratio of the intensities of D and G bands is an indicator of the quality of bulk samples. Similar intensities of these bands indicate a high quantity of structural defects. Raman spectra of the synthesized materials exhibited a peak of D band at 1334 cm⁻¹, 1336 cm⁻¹, 1350 cm⁻¹ and 1323 cm⁻¹ and G band at 1586 cm⁻¹, 1582 cm⁻¹, 1603 cm⁻¹ and 1594 cm⁻¹ for CNT, Co/CNT, GO, and Co/GO, respectively.



The G band in GO is shifted to a higher wave number due to the oxygenation of graphite, which results in the formation of sp³ carbon atoms. The D band in GO is broadened due to the reduction in size of the sp² domains by the creation of defects, vacancies, and distortions during oxidation. In order to confirm the formation of multi-wall carbon nanotubes, the ratio of the intensities of D and G bands present values characteristic for multi-wall carbon nanotubes. Also, the Raman spectrum from 250 nm to 350 nm does not exhibited any signal (not shown), which is typical for this structure [8].

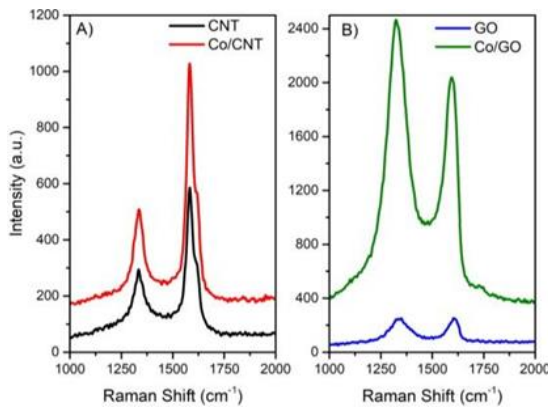


Figure 2. Raman spectra of CNT, Co/CNT (A) and GO, Co/GO (B).

The deposition of the Co nanoparticles clearly shows an increase in ID/IG ratio. The ID/IG ratio of CNT is 0.50 while that of Co/CNT 0.74. Similarly, the ID/IG ratio of GO is 0.98 while that if Co/GO is 1.21 showing that more defects appear after Co deposition.

Figure 3 shows the XRD pattern for all the material synthesized. For CNT and Co/CNT, a strongest peak appearing at the angle (2θ) of 26° is the C(002) reflection of the hexagonal graphite structure and the peak on 43° is related with C(100) [9]. This reflection of the hexagonal graphite structure does not appear for GO or Co/GO.

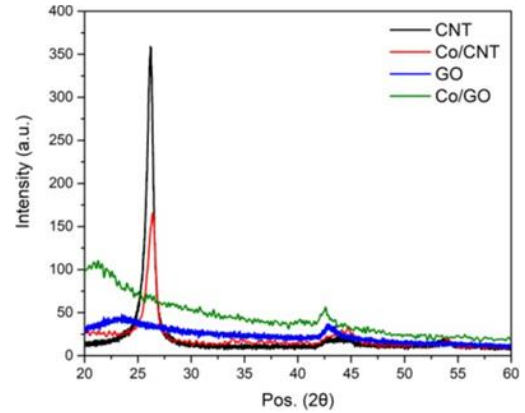


Figure 3. XRD Patterns of CNT, Co/CNT, GO_x, and Co/GO_x.

CV curves were performed at different potential scan rates in order to obtain the integrated charge and to calculate the specific capacitance (C_{sp}) according to equation 2:

$$C_{sp} = \frac{Q}{2 \cdot m \cdot \Delta V \cdot v} \quad (2)$$

Where, Q is the integrated charge of CV curve (mC), m is the nanomaterial loading (mg), ΔV is the potential window (mV), and v is the scan rate potential (mV s⁻¹). Figure 3 shows the C_{sp} vs. scan rate potential of CNT, GO, Co/CNT and Co/GO.

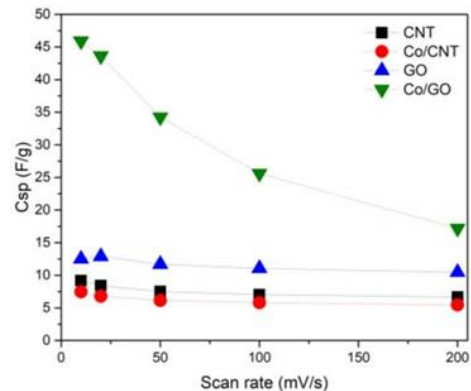


Figure 4. C_{sp} vs. scan rate of the synthesized materials.

When comparing the carbon supports, GO showed higher C_{sp} than CNT. However, when Co nanoparticles are deposited on to the supports, the C_{sp} increases more for Co/GO but remains constant for Co/CNT. The C vs. Log frequency plot could be used to identify the geometrical capacitance and the dielectric constant of any materials [10] accordingly to Equation 1.

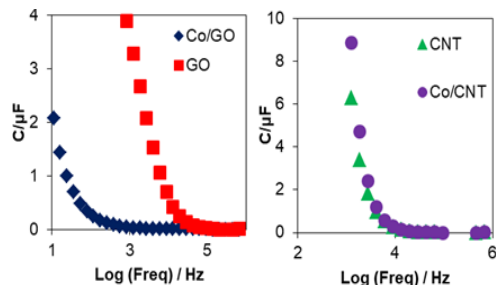


Figure 5. Cvs. Log (Freq) of the synthesized materials.

The capacitance of all the materials were estimated from Figure 5 and the dielectric constant of the materials are of the same order.

4. Conclusions

Co nanoparticles were deposited onto CNT and GO supports. The nanomaterials synthesized were characterized using XRD, TGA, and Raman showed a higher surface area for Co/GO. Based on the CV results, Co/GO exhibited the highest C_{sp} among all the materials studied which is attributed the large surface area of GO and the contribution of pseudo- capacitance from Co nanoparticles.

5. Acknowledgments

The authors are grateful for the technical support of Silva-Pereira H. and Rivera B. from LINAN- IPICYT. Authors would like to thank to Dr. Samgopiraj Velraj from Ohio University for his invaluable help in the revision process of this publication. Founding source for this work was sponsored from Tecnológico Nacional de México (TECNM) through the program “Apoyo a la Investigación Científica, Aplicada y Desarrollos Tecnológicos 2016” (project number 5870.16-P).

Referencias

- [1] M. Vangari, T. Pryor, and L. Jiang, "Supercapacitors: Review of materials and fabrication methods," *J. Energy Eng.*, vol. 139, no. 2, pp. 72-79, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000102](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000102)
- [2] C. Zhao and W. Zheng, "A Review for Aqueous Electrochemical Supercapacitors," *Front. Energy Res.*, vol. 3, no. May, pp. 1-11, 2015. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00023>
- [3] Z. Fan, J. Chen, K. Cui, F. Sun, Y. Xu, and Y. Kuang, "Preparation and capacitive properties of cobalt-nickel oxides/carbon nanotube composites," *Electrochim. Acta*, vol. 52, no. 9, pp. 2959-2965, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.09.029>
- [4] W. Chen, L. Yan, and P. R. Bangal, "Preparation of graphene by the rapid and mild thermal reduction of graphene oxide induced by microwaves," *Carbon N. Y.*, vol. 48, no. 4, pp. 1146- 1152, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.11.037>
- [5] A. Aguilar-Elguézabal, W. Antúnez, G. Alonso, F. P. Delgado, F. Espinosa, and M. Miki- Yoshida, "Study of carbon nanotubes synthesis by spray pyrolysis and model of growth," *Diam. Relat. Mater.*, vol. 15, no. 9, pp. 1329-1335, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2005.10.011>
- [6] M. Beltrán Gastélum, "Síntesis y caracterización de electrocatalizadores nanoestructurados y su aplicación en celdas de combustible a escala prototipo," Instituto Tecnológico de Tijuana, 2016.
- [7] S. Perumbilavil, P. Sankar, T. Priya Rose, and R. Philip, "White light Z-scan measurements of ultrafast optical nonlinearity in reduced graphene oxide nanosheets in the 400-700 nm region," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 107, no. 5, pp. 10-15, 2015. <https://doi.org/10.1063/1.4928124>
- [8] M. A. Atieh, O. Y. Bakather, B. Al- Tawbini, A. A. Bukhari, F. A. Abuilawi, and M. B. Fettouhi, "Characterization of carbon nanotubes by Raman spectroscopy," *Bioinorg. Chem. Appl.*, vol. 2010, no. 2, pp. 1-9, 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/603978>
- [9] T. A. Saleh, *The Role of Carbon Nanotubes in Enhancement of Photocatalysis, in Syntheses and Applications of Carbon Nanotubes and Their Composites*, S. Suzuki, Ed. Rijeka: InTech, 2013. <https://doi.org/10.5772/51050>
- [10] V. V. Brus, A. K. K. Kyaw, P. D. Maryanchuk, and J. Zhang, "Quantifying interface states and bulk defects in high-efficiency solution- processed small-molecule solar cells by impedance and capacitance characteristics," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 23, no. 11, pp. 1526- 1535, Nov. 2015. <https://doi.org/10.1002/pip.2586>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciente o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)



Dimensionality and geometry effects on a quantum carnot engine efficiency

Efectos de dimensionalidad y geometría en la eficiencia del motor quantum carnot

Herrera Alcantar Hiram Kalid¹, Carvajal García José Carlos¹, Rosales Pérez Osvaldo¹, Villarreal-Sánchez Rubén Cesar^{ORCID}², Iglesias-Vázquez Priscilla Elizabeth¹

¹Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México

²Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, carretera transpeninsular Ensenada-Tijuana 3917, colonia Playitas, Ensenada, Baja California, México

Autor de correspondencia: Priscilla Elizabeth Iglesias Vázquez, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana 3917, Colonia Playitas, Ensenada, Baja California, México. E-mail: piglesias@uabc.edu.mx.

Recibido: 21 de Julio del 2018

Aceptado: 15 de Enero del 2019

Publicado: 27 de Febrero del 2019

Resumen. - *Calculamos la eficiencia de un ciclo de Carnot cuántico para una partícula confinada en dos pozos de potencial infinitos diferentes, un pozo de potencial cilíndrico de radio variable y un pozo de potencial bidimensional cuadrado con periodicidad en uno de sus lados. Encontramos que la eficiencia depende directamente de la dimensionalidad y la geometría del pozo que confina a la partícula.*

Palabras clave: Ciclo de Carnot; Motor térmico; Confinamiento cuántico.

Abstract. - *We calculate the efficiency of a quantum Carnot cycle for a particle confined in two different infinite potential wells, a cylindrical potential well of variable radius and a two-dimensional square potential well with a periodicity in one of its sides. We find that the efficiency depends directly on the dimensionality and geometry of the well that confined the particle.*

Keywords: Carnot cycle; Heat engine; Quantum confinement.

1. Introduction

A classical heat engine is a device that extracts energy QH from a high temperature heat source, it generates work W with an amount of this energy and the rest is release into a low temperature drain. The efficiency η of a heat engine is defined by $\eta = W/QH$. It is well known that the heat engine reaches the highest possible efficiency following Carnot cycle model [1].

This cycle consists in a gas confined by a cylinder with a movable piston. Although classical heat engines have been extensively studied, it is of interest to study the systems and processes that could increase their efficiency. In recent years, with the developments of nanotechnology and quantum information processing, the study of quantum systems began to attract more attention. Consequently, the



Quantum Heat Engines (QHE) have been proposed theoretically [2-13]. In QHE, rather than having a gas confined in a cylinder with a movable piston, it is considered a single particle confined by a quantum potential well that walls play the role of the piston by moving in and out. Current studies on QHE have considered different type of potential wells, for example, a single particle confined by one (1D), two (2D) or three-dimensional (3D) infinite square potential well [3-5]. Based on this, in the present paper we further calculate the efficiency of a quantum Carnot cycle considering a single particle confined by two different types of potential wells, an infinite cylindrical potential well and an infinite 2D square potential well with periodicity, as to our best knowledge, these cases have not been considered. Comparison between these two cases enable us to extend our understanding about the dimensionality and geometry effects of quantum confinement on the efficiency of a QHE.

2. Methodology

We consider a particle of mass m , confined by two different types of quantum potential wells: an infinite cylindrical potential well (CPW) of radius r , in this case the particle is confined in the space inside the CPW. Also, we consider an infinite 2D square potential well (SPW) of length a that has periodicity every $2\pi R$ in the y direction, thus the space where the particle moves are now on a cylinder that has length a and circumference $2\pi R$.

2.1 Schrödinger equation and energy eigenvalues

We start from the time independent Schrödinger equation

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right] \psi = E \psi, \quad (1)$$

where \hbar is the Planck constant, V represents the potential, ψ is the wave function, E are the eigen energies obtained by the expectation value of the Hamiltonian [14], and ∇^2 is the Laplace operator in the corresponding coordinates of each of the potential wells, i.e., in cylindrical coordinates for the CPW and

in 2D Cartesian coordinates for the SPW. We shall use the symbol S to denote the length of the different types of potential wells, i.e., $S = r, a$. Once the energies E of each case is obtained (see Table 1), we calculated the force F exerted on the wall of the wells, which is defined as the negative derivative of the energy [3].

$$F = -\frac{dE(S)}{dS} \quad (2)$$

where the length S may vary. From table 1, we can see that each energy level state $E_{k,l}$ is inversely proportional to the length of the well, i.e., $E_{k,l}$ decreases as the length of the of the well increases, and vice versa, in this sense we can imagine that the walls of the potential well can move like a piston in a classical thermodynamics system [3].

Table 1. Energies obtained in each potential well. Here $k, l = 1,2,3, \dots$ are quantum numbers and z_{kl} is the k th zero of the Bessel function of order one.

| Potential well | Energies |
|----------------|---|
| CPW | $E_{k,l} = \frac{\hbar^2}{2mr^2} z_{kl}^2$ |
| SPW | $E_{k,l} = \frac{\hbar^2}{2m} \left[\left(\frac{\pi k}{a} \right)^2 + \left(\frac{l}{R} \right)^2 \right]$ |

2.2 Quantum Carnot cycle

The authors of Ref. 3 calculated the efficiency of a quantum Carnot cycle by using a single particle confined by a 1D infinite square potential well. Using the procedure described in Ref. 3, we further investigate the efficiency of a quantum Carnot cycle by considering different type of potential well that have not been reported. The quantum analogue of classical Carnot cycle consists of four processes described below and illustrated in figure 1.

1. Isothermal expansion. Starting at the ground state, which corresponds to the potential well of length S_1 , we expand isothermally this length up to S_2 and excite the second energy state of the system. In this process, a force F_1 is applied and an amount of energy QH is absorbed by the system.



2. Adiabatic expansion. The expansion continues adiabatically up to S_3 applying a force F_2 on the wall, and the system remains in the second energy state.

3. Isothermal compression. We compress isothermally the length of the well down to S_4 until the system is back in the ground state. A force F_3 is applied.

4. Adiabatic compression. The compression continues down to S_1 , applying a force F_4 on the wall. During this process the system remains in the ground state.

The area of the closed loop in figure 1 represents the work W done in a single cycle of the quantum Carnot engine [3]. There is an associated force F to each of the four process, from these, we calculate the total work W done during a full cycle by evaluating the following integrals.

$$W = \int_{S_1}^{S_2} F_1 dS + \int_{S_2}^{S_3} F_2 dS + \int_{S_3}^{S_4} F_3 dS + \int_{S_4}^{S_1} F_4 dS. \quad (3)$$

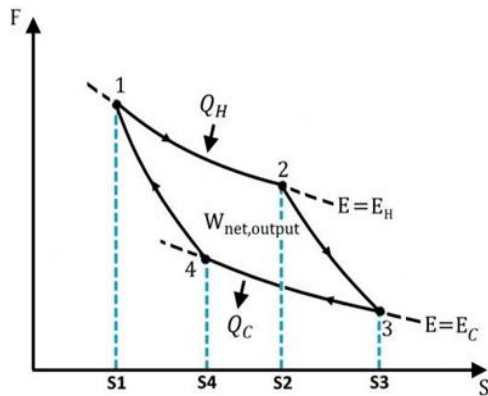


Figure 1. Illustration of a four-step quantum Carnot cycle, where S denote the length of the different types of potential wells and F is the force exerted on the wall of the wells.

We also calculate the energy QH absorbed by the system during the isothermal expansion, which is given by

$$Q_H = \int_{S_1}^{S_2} F_1 dS. \quad (5)$$

Therefore, calculating W and QH for the CPW and SPW, we finally calculate the efficiency $\eta = W/QH$ of each case.

Table 2. Efficiency obtained in each potential well as a function of its length. Here $z_{11} \approx 3.8317$ and $z_{01} \approx 2.4048$.

| Potential well | Efficiency |
|----------------|---|
| CPW | $\eta = 1 - \left(\frac{z_{11}r_1}{z_{01}r_3}\right)^2$ |
| SPW | $\eta = 1 - 4\left(\frac{R_1}{R_3}\right)^2$ |

3. Results and Discussions

In the case of the SPW, we remained unchanged the non-periodical side on the x direction and the radius R of the periodicity on the other side was varied. For the CPW, the parameter that was varied was the radius of the cylinder. For each case, the procedure indicated in the methodology section was developed. The efficiencies obtained are shown in Tables 2 and 3.

Table 3. Efficiency of each potential well as a function of its energy level states

| Potential well | Efficiency |
|----------------|---|
| SPW | $\eta = 1 - \left(\frac{E_C - \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2}}{E_H - \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2}}\right)$ |
| CPW | $\eta = 1 - \frac{E_C}{E_H}$ |

4. Conclusions

It was found, from the efficiencies shown above, that the efficiency of the quantum Carnot cycle depends of the length of the potential well. It should be noted that the importance of this work relies in the fact that the efficiency changes as a function of the geometry and dimension of the potential well that confined the single particle, this could help for future works to find a QHE with a higher efficiency and possible applications such as those proposed in Ref. 11, 12 and 13, where possible applications are proposed for a



QHE. As a future work, other type of thermodynamic cycles such as the Otto cycle or Stirling cycle can be analyzed to determine how the dimensionality and geometry affects their efficiencies.

References

[1] S. Carnot, “Réflexions sur la puissance motrice du feu”. Paris, Annales scientifiques de l’É.N.S. 2e série, tome 1, p. 393-457, 1872. http://www.numdam.org/item?id=ASENS_1872_2_1_393_0

[2] J. E. Geusic, E. O. Schulz-DuBios, and H. E. D. Scovil, “Quantum equivalent of the Carnot cycle,” *Phys. Rev.*, vol. 156(2), pp. 343. 1967. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.156.343>

[3] C. M. Bender, D. C. Brody, and B. K. Meister, “Quantum mechanical Carnot engine,” *J. Phys. A. Math. Gen.*, vol. 33, no. 24, pp. 4427–4436, 2000. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/33/24/302>

[4] H. T. Quan, Y. Liu, C. P. Sun, and F. Nori, “Quantum thermodynamic cycles and quantum heat engines,” *Phys. Rev. E*, vol. 76, no. 3, p. 31105, Sep. 2007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.76.031105>

[5] H. T. Quan, “Quantum thermodynamic cycles and quantum heat engines. II,” *Phys. Rev. E*, vol. 79, no. 4, p. 41129, 2009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.79.041129>

[6] T. D. Kieu, “The second law, Maxwell’s demon, and work derivable from quantum heat engines,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 93(14), pp.140403. 2004. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.140403>

[7] S. Abe and S. Okuyama, “Similarity between quantum mechanics and thermodynamics: Entropy, temperature, and Carnot cycle,” *Phys. Rev. E*, vol. 83, no. 2, p. 21121, Feb. 2011. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.021121>

[8] J. Wang, J. He, and Z. Wu, “Efficiency at maximum power output of quantum heat engines under finite-time operation,” *Phys. Rev. E*, vol. 85, no. 3, p. 31145, Mar. 2012. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.85.031145>

[9] S. Abe, “General formula for the efficiency of quantum-mechanical analog of the Carnot engine,” *Entropy*, vol. 15(4), pp. 1408. 2013. <https://doi.org/10.3390/e15041408>

[10] B. Zwiebach, *A First Course in String Theory*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511841620>

[11] P. P. Hofer, J.-R. Souquet, and A. A. Clerk, “Quantum heat engine based on photon-assisted Cooper pair tunneling,” *Phys. Rev. B*, vol. 93, no. 4, p. 41418, 2016. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.93.041418>

[12] P. P. Hofer, J. B. Brask, M. Perarnau-Llobet, and N. Brunner, “Quantum Thermal Machine as a Thermometer,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119, no. 9, p. 90603, Sep. 2017. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.090603>

[13] M. Campisi and R. Fazio, “The power of a critical heat engine,” *Nat. Commun.*, vol. 7, no. 1, p. 11895, 2016. <https://doi.org/10.1038/ncomms11895>

[14] R. Shankar, “*Principles of quantum mechanics*”. New York: Plenum Press. 1994. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0576-8>



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](#)