

Ingenierías

ISSN 1405-0676

92



ENERO - JUNIO 2022, Volumen 25, No. 92

Ingenierías

REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

- 3 Poliolefinas reforzadas con óxido de grafeno reducido.
Mediciones viscoelásticas**
Carlos A. Guerrero Salazar, Mayra Llamas Hernández,
Antonio Elizondo Martínez, M. Edgar Reyes Melo,
Tania E. Guerrero Salas

- 15 Shear modulus loss as damage indicator of structural
integrity in bonded joints**
José de Jesús Villalobos-Luna, Rodrigo Salazar-Colunga,
Pedro Lopez-Cruz, Moises Hinojosa Rivera

- 26 Realización electrónica de sistemas caóticos:
Parte 1, Analógicos cuadráticos**
Francisco Antonio Rodríguez Cruz, César de Jesús Chacón Rendón,
Angel Rodriguez-Liñan

- 46 Un viaje por el tiempo**
José Rubén Morones Ibarra

- 63 Colaboradores**

- 65 Información para colaboradores**

- 66 Código de ética**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIME

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



Ingenierías

Ingenierías, Volumen 25, N° 92, enero-junio 2022. Es una publicación semestral, editada por la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Domicilio de la Publicación: Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Pedro de Alba S/N, Edificio 7, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450. Teléfono: +52 (81) 83294020 Ext. 5854, Fax +52 81 83320904. Editor responsable: Dr. Juan Antonio Aguilar Garib. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2011-101411064600-102, ISSN: 1405-0676. Número de certificado de licitud de título y contenido: 15,525, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. Registro de marca ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial: En trámite. Impresa por: Desarrollo Litográfico S.A. de C.V., M. del Llano 924 Ote., Centro, Monterrey, Nuevo León, México, C.P. 64000. Fecha de terminación de impresión: 31 de enero de 2022. Tiraje: 800 ejemplares. Distribuido por: Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Pedro de Alba S/N, Edificio 7, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455.

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

Prohibida su reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Editor.

Impreso en México
Todos los derechos reservados
© Copyright 2021
revistaingenierias@uanl.mx

DIRECTORIO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Dr. Med. Santos Guzmán López
Rector

Dr. Juan Paura García
Secretario General

Mtra. Emilia Edith Vásquez Farías
Secretario Académico

Dr. Celso José Garza Acuña
Secretario de Extensión y Cultura

Lic. Antonio Ramos Revillas
Director de Editorial Universitaria

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Dr. Arnulfo Treviño Cubero
Director

Dr. Fernando Banda Muñoz
Subdirector académico

Dr. Juan Antonio Aguilar Garib
Editor responsable

M.C. Cyntia Ocañas Galván
Dr. Jesús G. Puente Córdova
Redacción

Gregoria Torres Garay
Tipografía y formación

Ing. Cosme D. Cavazos Martínez
Webmaster

René de la Fuente Franco
Impresor

CONSEJO EDITORIAL INTERNACIONAL

Dr. Mauricio Cabrera Ríos, Puerto Rico. UPRM / Dra. Ruth Kiminami, Brasil. UFSC, San Pablo / Dr. Juan Jorge Martínez Vega, Francia. Universidad de Toulouse III / Dr. Juan Miguel Sánchez, USA. UT-Austin / Dr. Zarel Valdez Nava, Francia. UPS-INPT-LAPLACE-CNRS.

CONSEJO EDITORIAL MÉXICO

Dr. Benjamín Limón Rodríguez, FIC-UANL / Dr. José Rubén Morones Ibarra, FCFM-UANL / Dr. Ubaldo Ortiz Méndez, FIME-UANL / Dr. Félix Sánchez De Jesús, ICBI-UAEH / Dr. Ernesto Vázquez Martínez, FIME-UANL.

COMITÉ TÉCNICO

Dr. Efraín Alcorta García, FIME-UANL / Dr. Rafael Colás Ortiz, FIME-UANL / Dr. Jesús De León Morales, FIME-UANL / Dr. Virgilio Ángel González González, FIME-UANL / Dr. Carlos Alberto Guerrero Salazar, FIME-UANL / Dra. Oxana Vasilevna Karissova, FCFM-UANL / Dr. Francisco Eugenio López Guerrero, FIME-UANL / Dr. Martín Edgar Reyes Melo, FIME-UANL / Dr. Roger Z. Ríos Mercado, FIME-UANL / Dr. Juan Ángel Rodríguez Liñán, FIME-UANL.

Poliolefinas reforzadas con óxido de grafeno reducido. Mediciones viscoelásticas

Carlos A. Guerrero Salazar, Mayra Llamas Hernández,
Antonio Elizondo Martínez, M. Edgar Reyes Melo, Tania E. Guerrero Salas
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

RESUMEN

Se analiza el efecto de óxido de grafeno reducido y del óxido de polietileno sobre las propiedades viscoelásticas de HDPE y PP. Los gráficos de la viscosidad dinámica presentan curvas muy similares en todos los casos. Utilizando porcentajes de rGO de 0.1% con 2% de PEO, se obtienen valores del módulo elástico cuatro veces más grandes que los de HDPE puro y tres veces más que el del PP puro. Con 0.5% de rGO en ambos composites, manteniendo el mismo porcentaje de PEO, se obtiene un módulo elástico tres veces más grande que el de las poliolefinas puras.

PALABRAS CLAVE

Grafeno, Composites, Viscoelasticidad, Polietileno de Alta Densidad, Polipropileno.

ABSTRACT

The effect of the reduced graphene oxide and the Poly-Ethylene Oxide on the viscoelastic properties of HDPE and PP are analyzed. The results of the dynamic viscosity are very similar in all cases. Using percentages of rGO of 0.1% with 2% of PEO, obtained values of elastic modulus for composite are four times than that of neat HDPE and three times than neat PP modulus. With 0.5% of rGO in both composites, maintaining the same percentage of PEO, the elastic module obtained is three times larger than those for two neat polyolefins.

KEYWORDS

Graphene, Composites, Viscoelasticity, High Density Polyethylene, Polypropylene.

INTRODUCCIÓN

Las poliolefinas son polímeros formados a partir de alquenos (hidrocarburos insaturados que disponen de moléculas con al menos un enlace doble carbono-carbono) tales como el etileno, propileno, buteno, isopreno, y penteno, o bien de copolímeros y modificaciones derivadas. Las poliolefinas son el grupo más numeroso de termoplásticos, siendo los más importantes el polietileno y el polipropileno, debido principalmente a sus propiedades como tenacidad, elongación, facilidad de procesamiento, bajo peso y bajo costo, entre otras.¹⁻³ Estas propiedades hacen de ellos materiales muy versátiles, ya que se pueden extruir, moldear y soplar, pudiendo utilizarse en una gran diversidad de aplicaciones. Sin embargo, para otro tipo de aplicaciones, vg., eléctricas, mecánicas, térmicas, estas propiedades remarcables no bastan, por lo que tienen que ser mejoradas o, peor aún, se tiene que cambiar de material.

Una alternativa que se ha seguido para mejorar las propiedades de las poliolefinas consiste en mezclarlas con diferentes tipos de partículas o fibras, buscando una sinergia entre las propiedades de los diferentes materiales. Esto da origen a los materiales llamados “composites”, los cuales consisten en la unión física de dos o más materiales que tienen propiedades físicas y químicas diferentes, pero al combinarlos, producen un nuevo material con características muy diferentes a las que poseen los originales. La estructura y morfología de un composite está formada principalmente por una fase conocida como matriz y al menos otra fase dispersa en aquella, la cual se conoce como refuerzo o

carga. El material empleado como matriz puede ser un polímero, un metal o un cerámico y la fase dispersa puede ser orgánica o inorgánica y en forma de partículas, fibras, hojuelas, etc.⁴⁻⁶

En las últimas décadas, entre los materiales más usados como refuerzo se encuentra el carbono y sus alótopos, *vg.*, grafito,^{7,8} nanotubos,⁸⁻¹⁰ grafeno y sus derivados,¹¹⁻¹⁴ principalmente. Lo anterior debido a que una cantidad muy pequeña de carbono o sus alótopos puede incrementar significativamente las propiedades de la matriz polimérica, aunado a que, en este tipo de refuerzos, su peso es mucho menor comparado con aquellos cerámicos o metálicos.¹⁵

El grafeno es un material formado por una o varias capas de átomos de carbono (<10) arreglados en forma hexagonal y empacados en una red 2-D en forma de panal de abeja. Se le considera el bloque de construcción básico de los fullerenos, nanotubos y grafito.¹⁶ Figura 1. Dado su tamaño nanométrico, el grafeno posee propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas remarcables. Sin embargo, fabricar composites de grafeno o sus derivados con poliolefinas es difícil, dada la naturaleza no polar de estas últimas, por lo que las placas de grafeno tienden a aglomerarse, exhibiendo una adhesión interfacial pobre.

Este trabajo analiza el efecto de la incorporación de concentraciones pequeñas de grafeno (<1% peso) sobre las propiedades viscoelásticas del polietileno de alta densidad (HDPE) y del polipropileno (PP). Se explora también el efecto de la adición de un agente compatibilizante, el polióxido de etileno (PEO), en las propiedades del composite.

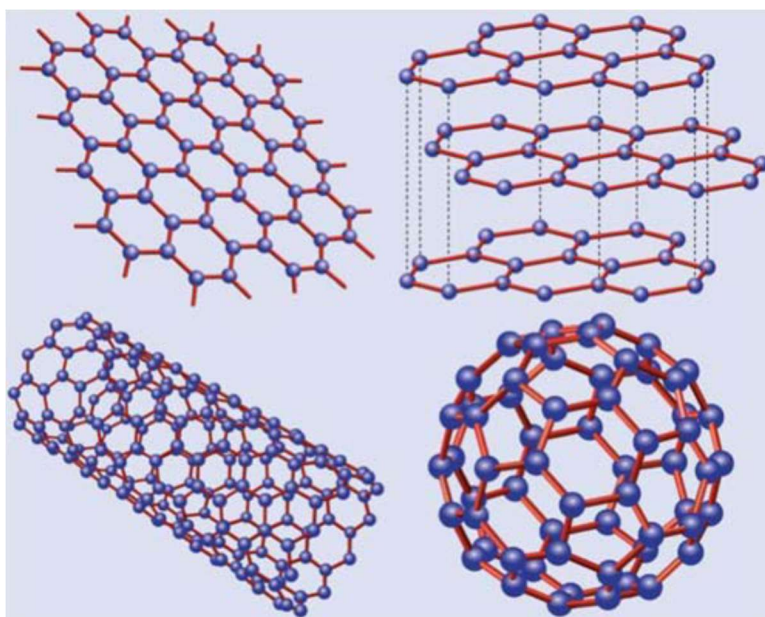


Fig. 1. El grafeno es un material 2-D que se considera como el bloque de construcción básico de otras formas gráficas. Se puede deformar en esfera, generando los fullerenos (0-D), enrollar para formar nanotubos (1-D) o apilar una capa sobre otra, formando el grafito (3-D).¹⁶

EXPERIMENTACIÓN

Materiales utilizados

Las poliolefinas seleccionadas para este trabajo consisten en un polietileno de alta densidad (Nova Chemicals) y un polipropileno (LyondellBasell). Las propiedades de estos materiales se enlistan en la tabla I. Para la obtención del grafeno, se usó grafito en polvo con un tamaño de partícula del orden de 20 μm . Este material se oxidó con permanganato de potasio (KMnO_4), nitrato de sodio (NaNO_3), ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 98%, peróxido de hidrógeno (H_2O_2) e hidróxido de sodio (NaOH). Todos los químicos provienen de Sigma Aldrich, grado reactivo y se usaron como se recibieron. Después de la oxidación, el GO se redujo usando hidrosulfito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) como agente reductor. En

parte de la experimentación se utilizó como agente compatibilizante polióxido de etileno (PEO, Sigma Aldrich) del cual se reporta un peso molecular, Mw, de 600,000 g/mol.

Tabla I. Propiedades de las poliolefinas utilizadas. Datos del proveedor.

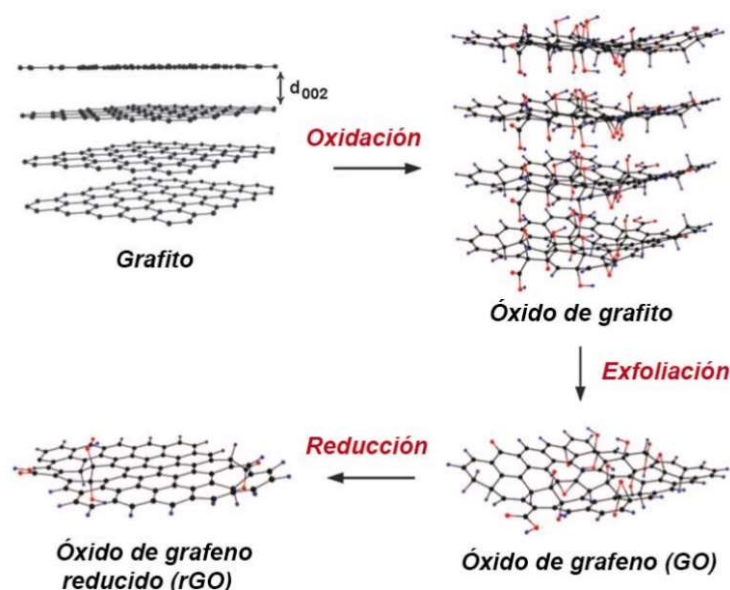
Poliolefina	Proveedor	ρ (g/cm ³)	Mw (g/mol)	T _f (°C)
Polietileno de alta densidad (HDPE, Sclair 19A)	Nova Chemicals	0.96	126,000	129
Polipropileno (PP, Profax 6523)	LyondellBasell	0.90	82,700	164

ρ = densidad; Mw = peso molecular; T_f = temperatura de fusión

Obtención de Óxido de Grafeno Reducido (rGO)

La producción de las láminas de grafeno mediante la reducción química del óxido de grafito se realizó siguiendo el procedimiento previamente descrito por los autores en otras publicaciones.^{17,18} La ruta más común para exfoliar el grafito es mediante el uso de agentes fuertemente oxidantes, produciendo así el óxido de grafeno (GO), el cuál es un compuesto de carbono hidrofílico y no conductor. El GO se puede exfoliar fácilmente en agua usando ultrasonido. Para oxidar el grafito se siguió el método de Hummers mejorado,¹⁹ con el cual el grafito se mezcla con permanganato de potasio (KMnO₄) y una mezcla concentrada 9:1 de ácido sulfúrico y ácido fosfórico (H₂SO₄/H₃PO₄). Este método proporciona un material altamente oxidado. Para recuperar las propiedades del grafeno, el GO se tiene que reducir, formándose lo que se conoce como óxido de grafeno reducido, rGO. Con la intención de evitar el uso de sustancias altamente tóxicas, reactivas y de difícil manipulación, como la hidracina y sus derivados, se utilizó como agente reductor el hidrosulfito de sodio, Na₂S₂O₄. Este proceso de reducción se usa en la industria textil, pero tiene el suficiente potencial para llevar a cabo la síntesis del rGO a gran escala. Para la reducción, el GO se deposita en sustratos de vidrio y se sumerge en una solución de hidrosulfito de sodio, hidróxido de sodio y agua destilada. Después de la reacción de reducción, el rGO se lava con agua destilada para eliminar residuos de la solución reductora y se seca en un horno al vacío. Una vez lavado y secado, el rGO se pulveriza en un mortero convencional, quedando el polvo listo para usarse en la preparación de los composites mediante la técnica de mezclado en fundido. La figura 2 representa el proceso de producción de las láminas de grafeno.

Para mejorar la interacción interfacial entre el rGO y la matriz poliolefínica, se realizó un segundo set experimental en donde, antes de reducir al GO, se combinó con un agente compatibilizante, siendo éste el Poli-Óxido de Etileno (PEO). Se agrega lentamente 1g de PEO en polvo a 10 ml de agua destilada a una temperatura de 80 °C, mezclándose lentamente con un agitador magnético hasta obtener una pasta viscosa. Manteniendo la agitación, se disminuye la temperatura a 40°C para después agregar gota a gota 50 ml de la solución acuosa de GO que se obtuvo después del ultrasonido. La pasta viscosa resultante se somete a un baño de ultrasonido durante 30 minutos para asegurar una buena dispersión. Después de esto, la pasta se coloca en una caja Petri para secarse en un horno de vacío a 60 °C durante 6 horas. El GO/PEO se saca de la caja Petri y se sumerge durante una hora en la solución reductora de hidrosulfito de sodio, procediendo de la misma manera a como se describió en el párrafo anterior.


 Fig. 2. Representación esquemática del proceso de producción del rGO. ²⁰

Composites Poliolefinas-rGO

Los nanocomposites poliolefinicos se fabricaron empleando la técnica de mezclado intensivo en fundido, para lo cual se usó un mezclador C.W. Brabender de doble husillo. Todo el proceso se llevó a cabo bajo una atmósfera de nitrógeno para evitar la oxidación de las muestras. La cámara del mezclador se calienta a la temperatura de trabajo, poniéndose a girar los rotores a 100 RPM. Cuando la cámara alcanza la temperatura deseada, 160°C para el HDPE o 180°C para el PP, se añade la poliolefina en forma gradual. Después de que se alcanza el estado estable, se alimenta el rGO, o el rGO/PEO en su caso, y se deja funcionando el sistema otros 10 min. Al final de esta etapa, el material se retira de la cámara de mezclado y se seca. La tabla II muestra la composición de los diferentes composites formulados.

Caracterización de los materiales

El óxido de grafeno reducido se caracterizó mediante la técnica de difracción de rayos X (PANalytical X'Pert Pro) con fuente de radiación $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=0.15418$ nm). El voltaje usado fue de 50KV, a una velocidad de 0.5°min^{-1} y con un ángulo de barrido, 2θ , de 1 a 40° . Se disolvió en etanol rGO en polvo, sometiénndose a ultrasonido; algunas gotas de esta solución se colocaron en una rejilla de cobre y se analizaron por microscopia electrónica de transmisión (JEOL, JEM-2100F) a un voltaje de aceleración de 200KV.

Tabla II. Composición de los composites formulados

MUESTRA	HDPE, wt%	PP, wt%	rGO, wt%	PEO, wt%
PE10	99.9	0	0.1	0
PP10	0	99.9		
PE50	99.5	0	0.5	0
PP50	0	99.5		
PE12	97.9	0	0.1	2.0
PP12	0	97.9		
PE15	94.9	0	0.1	5.0
PP15	0	94.9		
PE52	97.5	0	0.5	2.0
PP52	0	97.5		
PE55	94.5	0	0.5	5.0
PP55	0	94.5		

Para los composites, se evaluaron sus propiedades viscoelásticas midiendo la viscosidad compleja de las muestras en estado fundido, para lo cual se usó un reómetro rotacional de placas paralelas (Rheometric Scientific, SR-5000). Las pruebas fueron isotérmicas (180°C) y de tipo oscilatorio, en un rango de frecuencias de 0.1 a 100 rad/s. Todas las pruebas se realizaron bajo atmósfera de nitrógeno. Se analizaron también muestras sólidas, para lo cual se usó un analizador mecánico dinámico (Perkin Elmer DMA 8000) en modo tensión; se evaluaron los módulos y la $\tan \delta$ en función de la temperatura, en un intervalo de 25°C a 160°C, con una frecuencia constante de 0.5 y 1.0 Hz.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Óxido de grafeno reducido

La figura 3 muestra los difractogramas obtenidos para el grafito y para el rGO sintetizado. En el primer caso, es notorio un intenso pico en un ángulo de 26.38°, el cual corresponde a la reflexión en el plano (002) de la estructura gráfica.²¹ La distancia interplanar calculada de 0.337nm. Sin embargo, para el rGO no se aprecia ningún pico en el difractograma. Esto se puede atribuir a que las láminas del rGO que se obtienen no poseen una orientación uniforme y se encuentran bastante desordenadas, lo que disminuye considerablemente las interferencias constructivas de los rayos X difractados, por lo que se infiere que la diferencia entre los dos difractogramas se debe a que en el rGO no existen arreglos tridimensionales de largo alcance. Estos datos están en concordancia con resultados reportados previamente en otros trabajos.^{21,22}

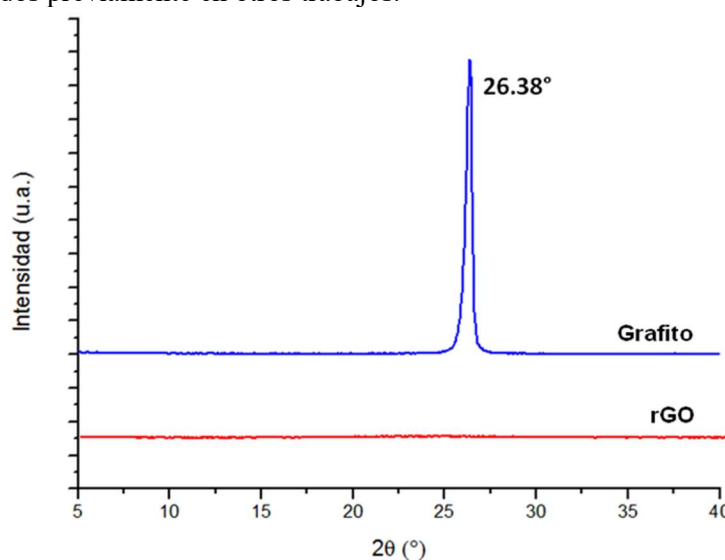


Fig. 3. Difractogramas de rayos X para el grafito y el rGO sintetizado.

En otras mediciones que no se reportan en este trabajo, se obtuvo también el difractograma del GO, observando que la intensidad del pico en 26.46° disminuye considerablemente, apareciendo un nuevo pico en 11.30° lo cual se ocasiona debido a la expansión entre las capas de grafito por la introducción de grupos funcionales que contienen oxígeno²² y la consecuente distorsión del arreglo hexagonal de los átomos de carbono del grafito. Sin embargo, se sigue observando un pico menos intenso a 26.69°, indicando que la oxidación del grafito no fue completa. La distancia interplanar para el GO fue de 0.782nm, mucho mayor a la del grafito debido a, como ya se mencionó, la expansión entre las capas al anclarse los grupos funcionales que contienen oxígeno.

Las imágenes de Microscopía electrónica de transmisión (TEM) de la figura 4 corresponden a nanoestructuras de rGO. En ellas se puede observar láminas de grafeno multicapa superpuestas, las cuales coinciden con las que han sido reportadas previamente en la literatura.²³ La textura de las hojas es altamente cristalina con pocos defectos, debido a las etapas de ultrasonido y centrifugado.

La morfología del rGO se asemeja a nanoláminas corrugadas. En las figuras es posible apreciar zonas más oscuras, lo que muy probablemente esté asociado a un aumento en el número de láminas apiladas. Las líneas que se observan en algunas secciones podrían representar láminas de grafeno agrupadas que posiblemente, después de eliminar el solvente que las mantenía separadas, colapsaron y se mantuvieron unidas durante y después del proceso de reducción química.

Composites Polioléfinas-rGO

La viscosidad dinámica permite conocer el comportamiento viscoelástico del material bajo fuerzas oscilatorias de corte durante los procesos de transformación de polímeros. La figura 5 muestra las mediciones de la viscosidad dinámica (η') para las polioléfinas vírgenes y los composites Polioléfina-rGO. El fin del comportamiento Newtoniano, que corresponde a relajaciones tipo líquido, se aprecia a bajas frecuencias, tanto para el PP como para el HDPE y sus composites.

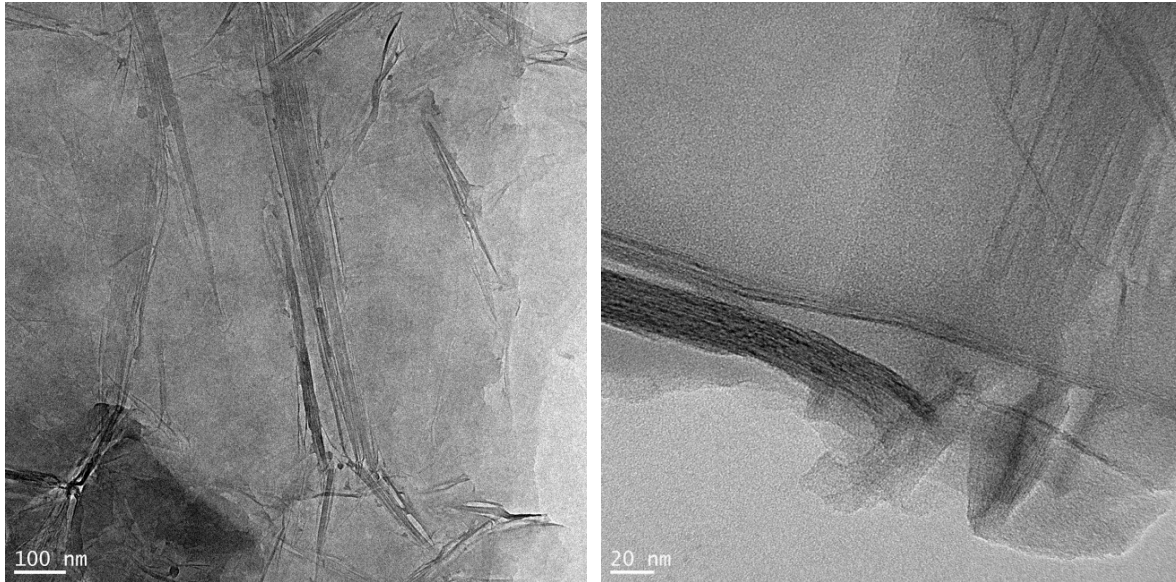


Fig. 4. Imágenes de rGO obtenidas mediante microscopía electrónica de transmisión.

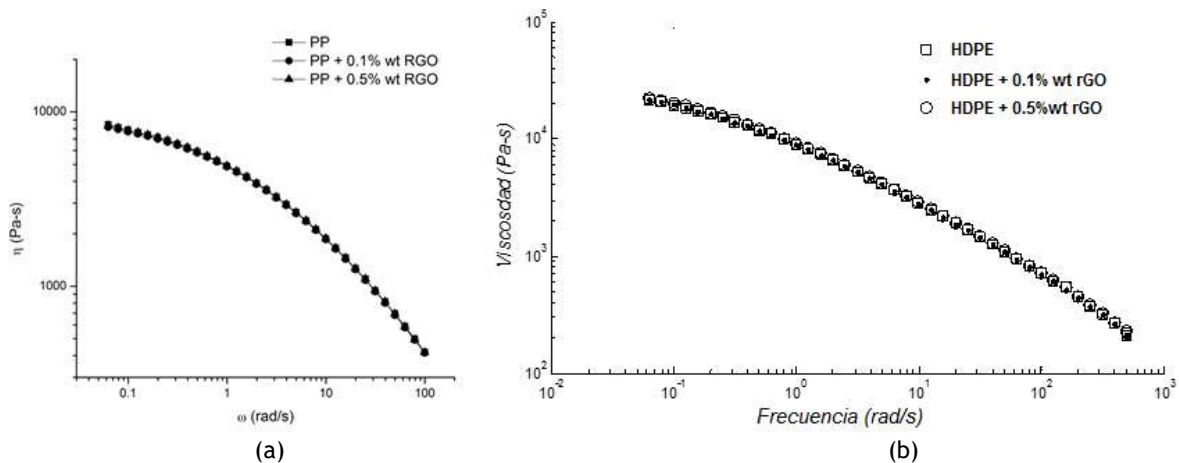


Fig. 5. Variación de la parte real de la viscosidad compleja con la frecuencia para los composites (a) Polipropileno-óxido de grafeno reducido y (b) Polietileno de alta densidad-óxido de grafeno reducido.

Para frecuencias arriba de 10^0 , y para todos los materiales analizados, se aprecia el comportamiento pseudoplástico, disminuyendo la viscosidad a medida que aumenta la frecuencia. Es evidente que la viscosidad de la matriz, HDPE y PP, no se ve grandemente influenciada por las cantidades

adicionadas de rGO, las cuales fueron muy pequeñas, implicando una falta de interacción entre el refuerzo y la matriz. La existencia de grupos funcionales en base a oxígeno que subsistieron en el rGO y a la naturaleza no polar de las dos poliolefinas pudiera ser otra causa de la aparente falta de interacción. Se esperaba que al añadir el PEO como compatibilizante, el rGO y la poliolefina tuvieran una mejor interacción interfacial, lo cual se vería reflejado en una mayor oposición al flujo y, por ende, en un incremento en la viscosidad de las muestras. Sin embargo, la figura 6 presenta un comportamiento muy similar al observado en las muestras sin compatibilizante, en donde la curva de viscosidad de las poliolefinas puras es prácticamente igual a la de los composites con PEO y rGO. Dado que en estos resultados no se alcanza a apreciar el efecto del refuerzo y del compatibilizante en la matriz plástica, se procedió a evaluar el módulo elástico de los composites, con y sin compatibilizante.

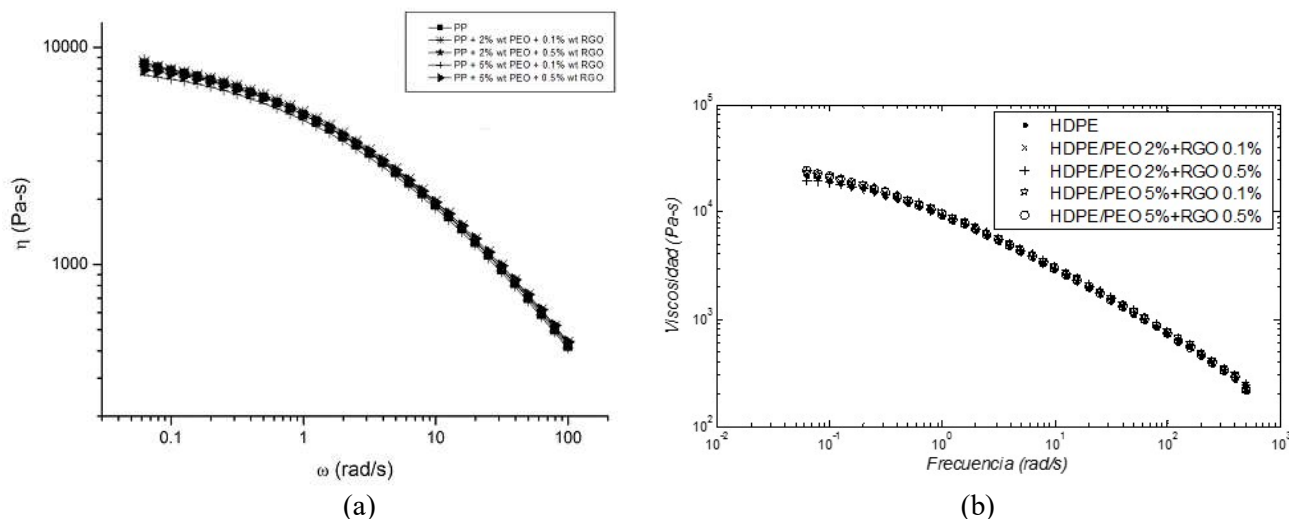


Fig. 6. Variación de la parte real de la viscosidad compleja con la frecuencia para los composites (a) Polipropileno/óxido de grafeno reducido-polióxido de etileno y (b) Polietileno de alta densidad/óxido de grafeno reducido-polióxido de etileno.

Se evaluó el efecto del rGO en el módulo de las poliolefinas, a temperaturas por debajo de su punto de fusión, usando el análisis dinámico mecánico en modo tensión desde una temperatura de 25 hasta 160°C para el PP y desde 25 hasta 120°C para el HDPE. La figura 7 muestra los resultados para los composites de PP con agente compatibilizante. En ella se aprecia claramente el efecto positivo del PEO, ya que, en los cuatro casos, el módulo elástico del composite es mucho mayor que el del polipropileno puro. Esto se hace más evidente a bajas temperaturas, donde el módulo tiene su valor máximo. A altas temperaturas, y a medida que la poliolefina se acerca a su punto de fusión, la diferencia entre los módulos tiende a desaparecer. La figura 8 muestra los valores del módulo a 30°C, normalizándolo con el valor del mismo parámetro para el PP puro. Se puede apreciar que las muestras con 0.5% de rGO son las que tiene un valor mayor del módulo, 3.5 veces más que el PP puro para 2% de PEO y 2.9 veces más para la muestra con 5% de PEO.

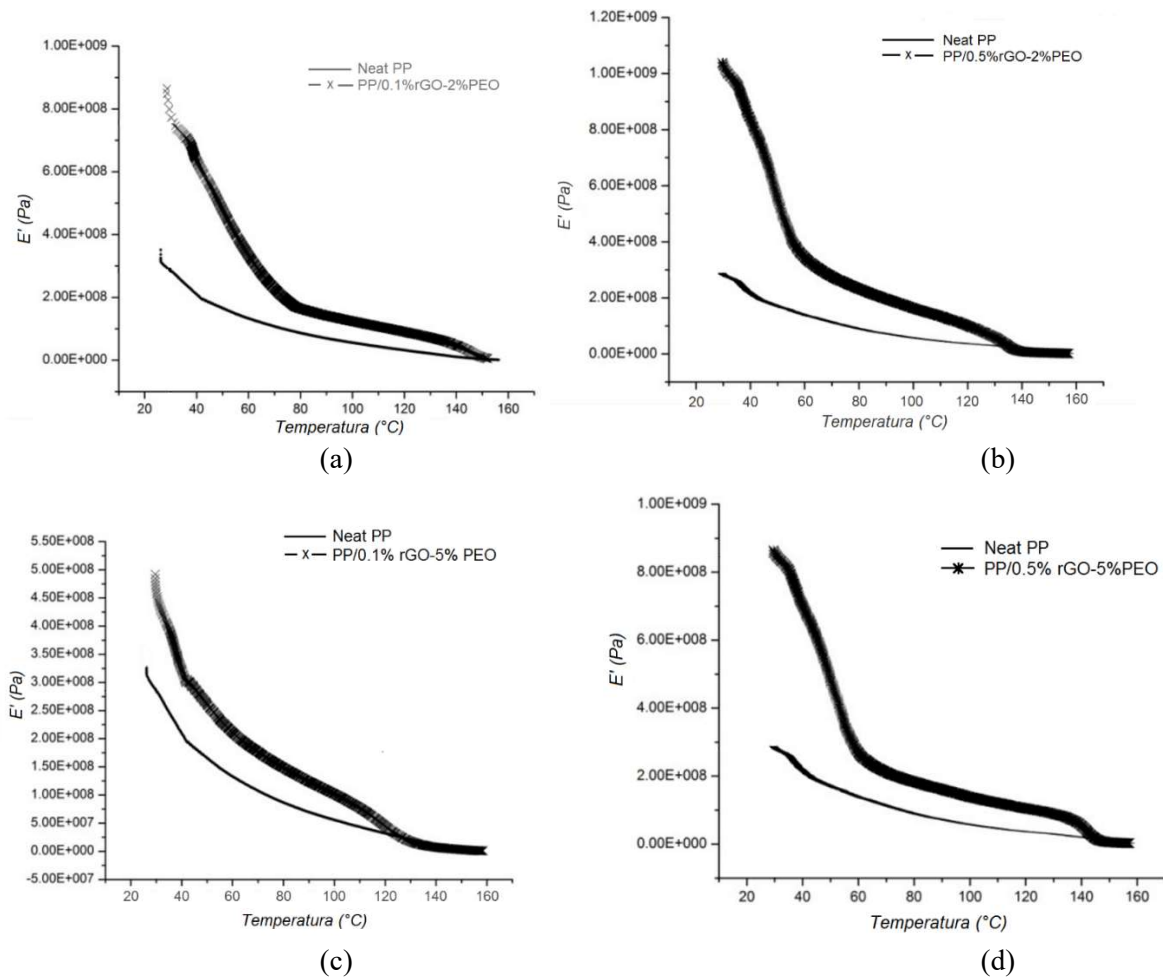


Fig. 7. Módulo elástico de los composites PP/rGO-PEO en función de la temperatura.

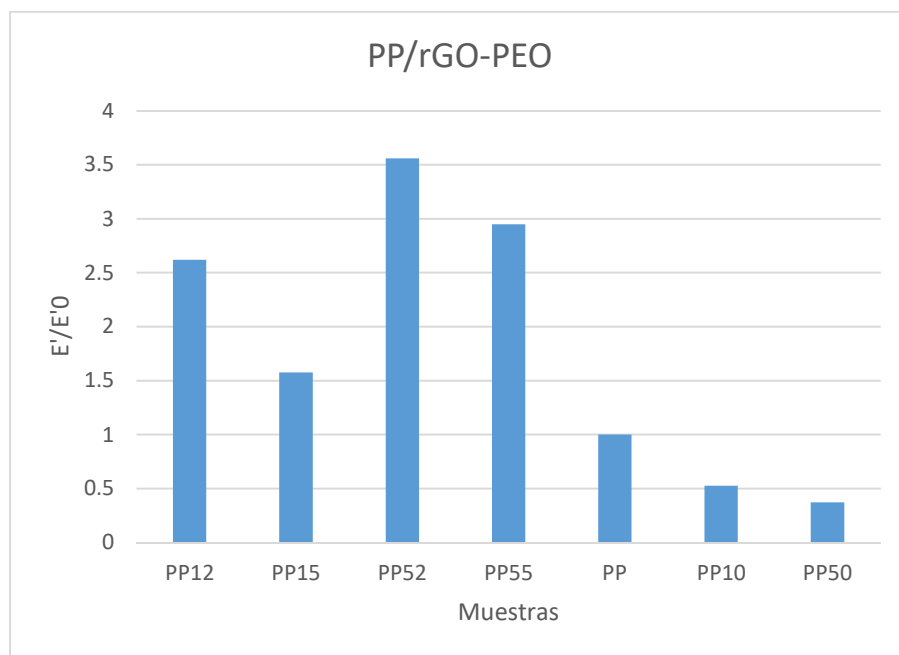


Fig. 8. Módulo elástico normalizado a 30°C para las muestras PP/rGO-PEO. E'₀ corresponde al valor del módulo del PP puro.

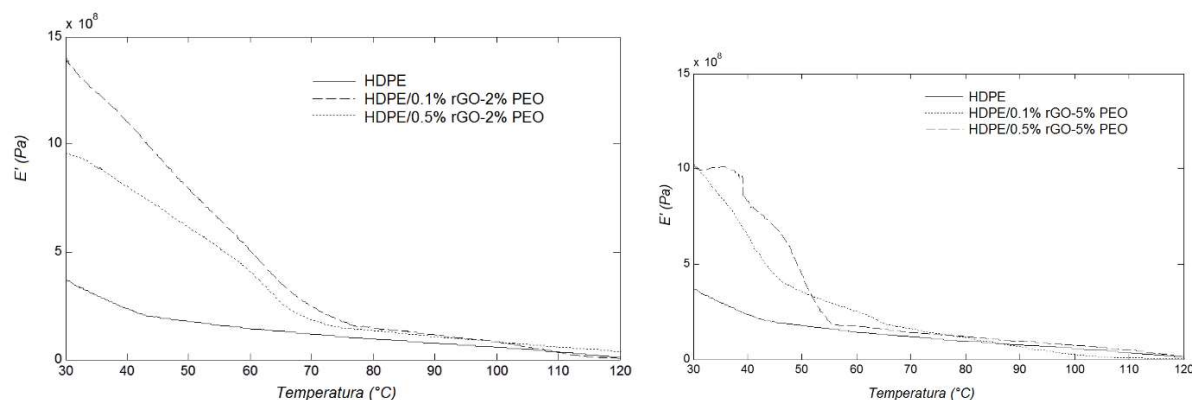


Fig. 9. Módulo elástico para los composites HDPE/rGO-PEO en función de la temperatura.

Para el caso del HDPE, se aprecia un comportamiento muy similar al del PP, es decir, el módulo elástico del composite, con agente compatibilizante y a bajas temperaturas, es mayor que el del HDPE puro. En efecto, a una temperatura de 30°C, el módulo de la muestra con 0.1 de rGO y 2% de PEO es 3.8 veces mayor que el del HDPE y con la misma cantidad de rGO, pero con 5% de PEO el incremento es de 2.78 veces. Los composites con 0.5% de rGO presentaron un módulo muy similar al obtenido para la muestra PE15, como se muestra en la figura 10. Este comportamiento, tanto para el PP como para el HDPE, se puede explicar considerando que el PEO mejora la adhesión interfacial, lo cual es una manera muy eficiente de mejorar la interacción entre el rGO y la matriz poliolefinica.²⁴ En los composites de PP y HDPE a los que no se les agregó PEO se puede apreciar que el módulo de la poliolefina pura es mayor que el de los composites con diferentes cantidades de rGO, lo cual es indicio de la nula interacción entre las matrices plásticas y el grafeno reducido, comportándose este último como impureza, ya que a mayor cantidad de rGO, menor el valor del módulo. Esta situación se revierte con el agente compatibilizante, tal y como queda evidenciado en las figuras 8 y 10.

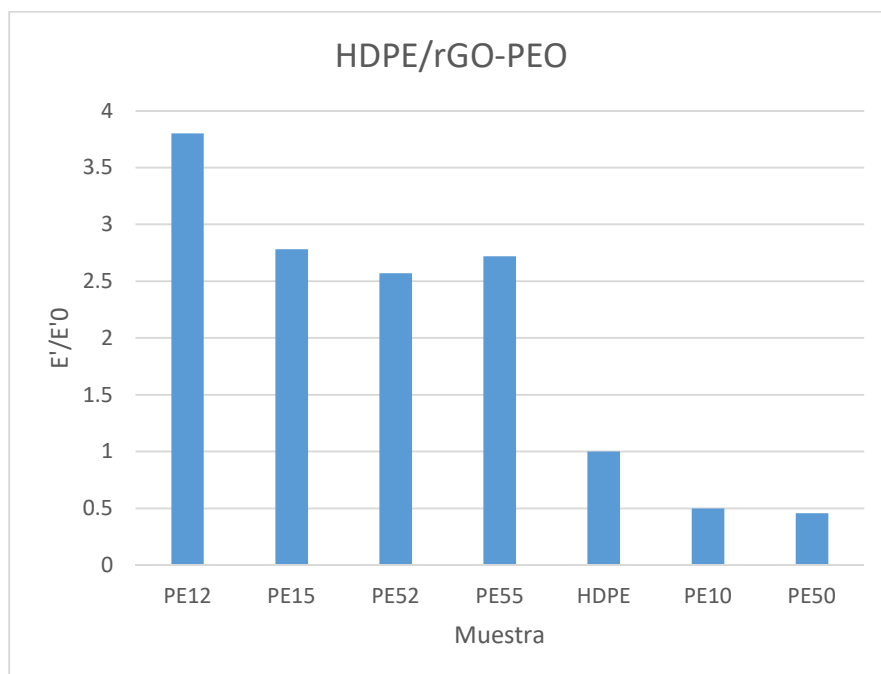


Fig. 10. Módulo elástico normalizado a 30°C para las muestras HDPE/rGO-PEO. E'_0 corresponde al valor del módulo del HDPE puro.

CONCLUSIONES

Se prepararon composites de PP y HDPE con diferentes concentraciones de óxido de grafeno reducido con y sin un agente compatibilizante. Los resultados de la viscosidad dinámica no reflejan ningún efecto del rGO y/o del compatibilizante en la matriz poliolefinica, ya que las curvas obtenidas son muy similares en todos los casos. Probablemente con porcentajes mayores de rGO se podría apreciar mucho mejor su efecto en esta propiedad. Para el caso del módulo elástico, las cantidades añadidas del rGO no actúan como refuerzo, sino como impurezas, ya que el valor de la propiedad medida en los composites es menor a la de la poliolefina pura. Esta situación cambia al agregar el PEO, ya que en el composite con porcentajes de rGO tan bajos como 0.1% y 2% de PEO, se obtienen valores de casi cuatro veces el módulo del HDPE puro y de casi tres veces el módulo del PP puro. Al aumentar el porcentaje de rGO a 0.5% se obtienen valores del módulo alrededor de tres veces más altos para los composites que para las poliolefinas puras.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cornelia Vasile, Handbook of Polyolefins. 2nd Ed., Revised and Expanded, Marcel Dekker, New York, USA (2000).
2. Andrew J. Peacock, Handbook of Polyethylene. Structures, Properties and Applications, Marcel Dekker, New York, USA (2000).
3. Clive Maier, Teresa Calafut, Polypropylene. The Definitive User's Guide and Databook, Plastic Design Library, New York, USA (1998).
4. Ehsan Bafekrpour (Ed.), Advanced Composite Materials: Properties and Applications, De Gruyter Open Ltd, Berlin, Germany (2017).
5. Deborah D. L. Chung, Composite Materials. Science and Applications. 2nd Ed., Springer Verlag, London (2010).
6. Klaus Friedrich, Stoyko Fakirov, Zhong Zhang, Polymer Composites. From Nano to Macro Scale, Springer, New York, USA (2005).
7. I. Krupa, I. Novák, I. Chodák, Electrically and thermally conductive polyethylene/graphite composites and their mechanical properties, Synthetic Metals 145 (2004) 245–252.
8. A Marcincin et al, Spinning, structure and properties of PP/CNTs and PP/carbon black composite fibers, 2014 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 64 012004.
9. Zdenko Spitalsky, Dimitrios Tasisb, Konstantinos Papagelis, Costas Galiotis, Carbon nanotube polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties, Progress in Polymer Science 35 (2010) 357–401
10. Maziyar Sabet, Hassan Soleimani, Mechanical and electrical properties of low density polyethylene filled with carbon nanotubes 2014 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 64 012001.
11. Saibom Park, Siyao He, Jianeng Wang, Andreas Stein, Christopher W. Macosko, Graphene-polyethylene nanocomposites: Effect of graphene functionalization, Polymer 104 (2016) 1-9.
12. Huanmin Li, Xu-Ming Xie, Polyolefin-functionalized graphene oxide and its GO/HDPE nanocomposite with excellent mechanical properties, Chinese Chemical Letters 29 (2018) 161–165.
13. Bin Wang, Dan Peng, Ruihua Lv, Bing Na, Hesheng Liu, Zhong Yu, Generic melt compounding strategy using reactive graphene towards high performance polyethylene/graphene nanocomposites, Composites Science and Technology 177 (2019) 1–9
14. Muhammad Z. Iqbal, Ahmed A. Abdala, Vikas Mittal, Sönke Seifert, Andrew M. Herring, Matthew W. Liberatore, Processable conductive graphene/polyethylene nanocomposites: Effects of graphene dispersion and polyethylene blending with oxidized polyethylene on rheology and microstructure, Polymer 98 (2016) 143-155.
15. Hongyu Chen, Valeriy V. Ginzburg, Jian Yang, Yunfeng Yang, Wei Liu, Yan Huang, Libo Du, Bin Chen, Thermal conductivity of polymer-based composites: Fundamentals and applications, Progress in Polymer Science 59 (2016) 41–85.
16. A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, A. K. Geim, The electronic properties of graphene, Rev. Mod. Phys (2009) Vol. 81, No. 1 pp 109-162
17. Carlos A. Guerrero Salazar, Paloma B. Jiménez Vara, Virgilio A. González González, Tania E. Guerrero Salas, Composites de polietilen tereftalato (PET) con óxido de grafeno reducido (rGO), a ser publicado en Ingenierías (2019).
18. Mayra I. Llamas Hernández, Carlos A. Guerrero Salazar, Martín E. Reyes Melo, Juan F. Luna Martínez, Comportamiento elástico y morfológico de compuestos polipropileno-grafeno, Ingenierías (2015) Vol XVIII, 68, pp 32-40
19. Daniela C. Marcano, Dmitry V. Kosynkin, Jacob M. Berlin, Alexander Sinitskii, Zhengzong Sun, Alexander Slesarev, Lawrence B. Alemany, Wei Lu, James M. Tour, Improved Synthesis of Graphene Oxide, ACS Nano, Vol. 4, No. 8, 4806-4814, 2010.
20. Hua Bai, Chun Li, Gaoquan Shi, Functional Composite Materials Based on Chemically Converted Graphene, Adv. Mater. 2011, 23, 1089–1115.

21. Jianfeng Shen, Yizhe Hu, Min Shi, Xin Lu, Chen Qin, Chen Li, Mingxin Ye, Fast and Facile Preparation of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide Nanoplatelets, *Chem. Mater.* 2009, 21, 3514–3520.
22. L. Stobinski, B. Lesiak, A. Malolepszy, M. Mazurkiewicz, B. Mierzwa, J. Zemek, P. Jiricek, I. Bieloshapka, Graphene oxide and reduced graphene oxide studied by the XRD, TEM and electron spectroscopy methods, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 195 (2014) 145–154.
23. D.P. Hansora, N.G. Shimpi, S. Mishra, Graphite to Graphene via Graphene Oxide: An Overview on Synthesis, Properties, and Applications, *JOM*, Vol. 67, No. 12, 2015, pp 2855-2868.
24. Huanmin Li, Xu-Ming Xie, Polyolefin-functionalized graphene oxide and its GO/HDPE nanocomposite with excellent mechanical properties, *Chinese Chemical Letters* 29 (2018) 161–165.

Shear modulus loss as damage indicator of structural integrity in bonded joints

José de Jesús Villalobos-Luna, Rodrigo Salazar-Colunga, Pedro Lopez-Cruz,
Moises Hinojosa Rivera

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León.

ABSTRACT

Damage in single lap joints under shear load was assessed. Specimens were tested in accordance with ASTM D1002-10(2019). Controls were taken on adhesive and surface preparation, adhesive thickness, and load-specimen alignment. Digital Image Correlation was used to measure stresses over the adhesive, and shear modulus variation and percent of damage were assessed. Results show shear modulus losses against shear stress. Finally, early damage evolution was determined up to 10% of the shear load rate and later, increasing up to 70%-96%.

KEYWORDS

Bonded joints, Shear Modulus Loss, Digital Image Correlation, Damage Assessment, Structural Integrity.

RESUMEN

Se evaluó el daño en uniones de traslape simple bajo carga cortante. Las muestras se probaron de acuerdo con la norma ASTM D1002-10(2019). Se controló la preparación de la superficie, el espesor del adhesivo y alineación de la carga. La correlación digital de imágenes se utilizó para medir los esfuerzos sobre el adhesivo y se evaluó la variación del módulo de corte y el porcentaje de daño. Los resultados muestran pérdidas en el módulo de corte en función del esfuerzo cortante. Finalmente, se determinó la evolución temprana del daño hasta un 10% de cortante, e incrementando hasta alcanzar el 70%-96%.

KEYWORDS

Uniones Adhesivas, Pérdida del Módulo de Corte, Correlación Digital de Imágenes Evaluación del Daño, Integridad Estructural.

INTRODUCTION

Fracture mechanics is an important part and logic result of the field of strength of materials. Early work on the strength of materials focused first on basic properties and later, as the theories of elasticity and plasticity evolved to include structures with flaws were developed, on the strength of structures components containing stress concentrators. Fracture mechanics deals with the strengths of materials and structures which contain flaws in the form of detectable or visible sharp cracks.

The fundamental concept of damage has several meanings according to the context and application; however,¹ described the concepts of failure, damage, and defect in a hierarchical form as described below.

Failure. It is when a structure cannot operate satisfactorily.

Damage. It is when the structure no longer operates in ideal conditions, but can operate in satisfactory conditions, but in a sub-optimal way.

Defect. It is inherent in the material and statistically all materials will contain a known number of defects. This means that the structure will operate optimally even if the constituent materials contain defects.

Therefore, the main objective of a damage theory is to allow prediction of lifetime of the structure. Then the remaining life concept is a natural way to define damage. Damage is the center of the study of the Continuum Damage Mechanics (CDM) addresses among others the study of the growth of micro-cracks and micro-voids (and other defects) and their effect on the mechanical behavior of the material. Further consideration is the direct effect of damage on the mechanical properties of materials which result in a significant influence on the safety aspect of engineering structures.

Due to the presence of damage at the microscopic level that generates an effect on the macroscopic properties of materials or structures, several groups of researchers have proposed that a damage index can be associated with changes observed in some properties such as the change of the area of the cross section in a standardized specimen or the change in the rigidity of the structure compared to a pristine or undamaged condition.

Proposing² several scalar damage variables. The first scalar damage variable is defined in terms of the reduction in cross sectional area, while the second scalar damage variable is defined in terms of the reduction in the elastic modulus or elastic stiffness. Based in ^{2, 3, 4, 5} the Damage Index (*ID*) can be determined with the scalar variable of stiffness change damage:

$$ID = 1 - \frac{E}{E_o} \quad \text{Equation 1}$$

Where *E* is the elastic modulus of the body or structure with the presence of damage and *E_o* it is the effective elastic module, in pristine condition or without failure.

Figure 1.a, shows a comparison of the elastic modulus can be seen under fault conditions *E* and the effective modulus in original conditions, pristine or without failure *E_o*. The elastic modulus *E* is constant if the elasticity properties in the adhesive remains, but if there are elasticity properties variations the elastic modulus behavior must be different. Figure 1.b. shows the theoretical variation of the elastic modulus against applied stress.

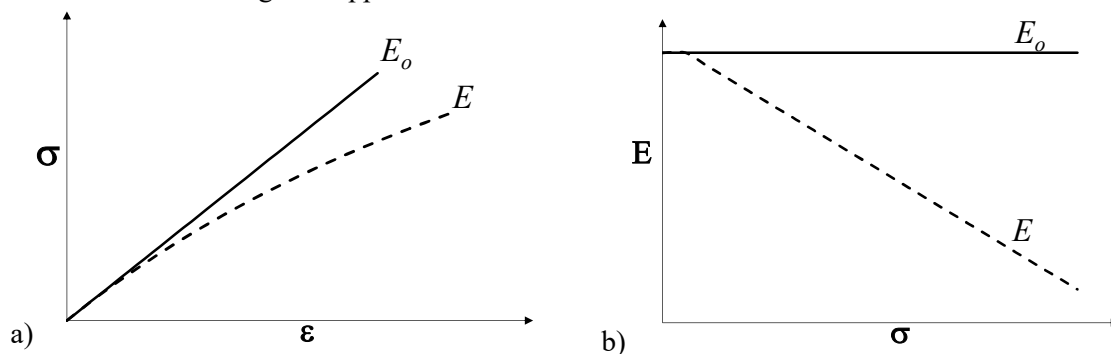


Fig. 1. a) Damaged and effective moduli of elasticity, b) Elasticity degrades against stress.

ADHESIVE JOINTS DAMAGE

One of the most important challenges of structural adhesive bonds is related to the difficult to detect the damage in advance or until the defect evolves and a “symptom” reveals its presence inside the material or structure. The study of the mechanics of damage in adhesive joints is carried out in a

multidisciplinary context; however, it is an open and extensive field to research and with an impact on the strength, durability, and application of adhesive joints in high-tech structures and primary structures with high demands of mechanical performance and safety like aeronautics, space, automotive, wind energy, shipping, defense, etc.

Published⁶ the effect of many parameters for optimization and maximizing the fatigue resistance and durability of adhesive joints. These parameters were identified as geometric parameters, material parameters, surface loading and treatment conditions, and curing conditions.

In 2009⁷ and in⁸ Worked on predicting strength on joints with both adhesive and rivets. In theory, adding a rivet to the adhesive bond allows to have a predictable fault path first in the rivet acting as a mechanical fuse before the adhesive bond fails; however, this premise is not always the safest, acceptable, or certifiable. For instance, in the case of composite materials, the adhesive bond can fail before the rivet due to damage caused to the substrate and the adhesive itself generating concentrations of stresses that significantly impact the structural integrity and can significantly reduce the mechanical strength of the complete joint.

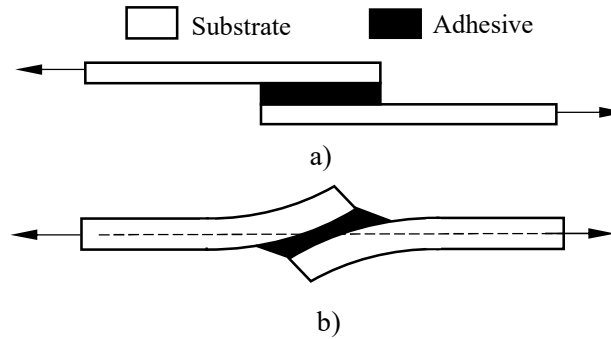
In 2015⁹ published a study about the flaws in adhesive bonds, the aim of the research was to analyze the strength and performance of the commercial epoxy adhesive 3M 9323 B/A with dissimilar substrates using Carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP). As a preliminary approach the interest was to create a simple and realistic procedure able to produce practical results that could be used for standard bonded model calculations. The literature review and the state of the art aimed to get perfect results, on the other hand, the objective was to find results to be implemented on the daily basis, adjusted to the imperfections made for specimen manufacture. Antunes comments that there are factors during the elasticity test methods that affects the quality of the results. The slip from grips and the air entrapped on the adhesive during mixing and spreading affects the elastic parameters and important deviation for literature was found. Since the research was focused on the adhesive's parameters assessment, a peeling test was carried out. It was found that specimen manufacturing errors, misalignment between bonded areas and the thickness control may affect the results and the failure evolution. The dissimilar substrates study there was not conclusive.

In 2016,¹⁰ reported numerical and analytical models using the cohesive zone along with the extended finite element method to assess the damage in simple overlap adhesive joints. The analytical models were based on the method,¹¹ the model¹² and the elastic model.¹³

SHEAR STRENGTH AND DAMAGE INDEX ON ADHESIVE JOINTS

Bonding by adhesives is usually the most appropriate solution when it comes to joining physically dissimilar or metallurgically incompatible materials, thermoset polymers, ceramics, elastomers, very thin materials, or substrates of very small size. Adhesive bonding is generally also suitable when it comes to joining large areas or when the use of adhesives means great improvements in terms of productivity. The central component of structural adhesive joints are high-performance adhesives such as epoxy polymer resins with thermo-mechanical and viscoelastic properties.

An *adhesive* is a substance capable of containing at least two surfaces to bind them together in a strong and permanent way. Adhesives are chosen for their retention and bonding power. In general, they are materials that have high shear and tensile strength. The most common type of structural adhesive bonding is single lap joint (SLJ) in which the load is transferred from one substrate to another by shedding stresses in the adhesive (figure 2).



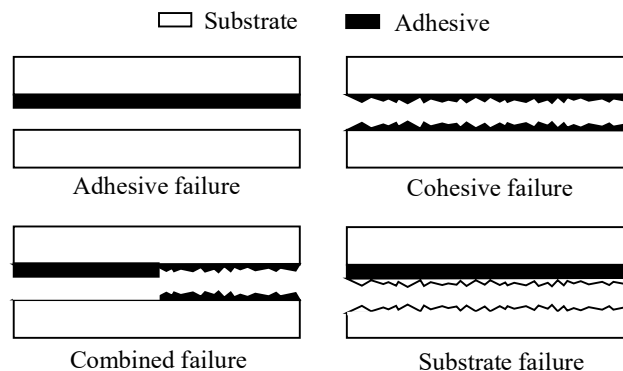
Source: Figure drawn by the autor.

Fig. 2. Single overlap bonding, a) at initial load without deformation of the substrates, b) at maximum load with deformation of the substrates.

Because the applied loads are off-center in a simple overlap joint, the bending action caused by the applied load creates normal stresses (splitting stress) in the direction of the adhesive thickness. The combination of cutting stress and normal stress reduces the strength of the joint at the ends of the overlap. For the purposes of selection and characterization of adhesives, it is very common to test SLJ joints because they are easy to manufacture.

As shown in the Figure 3 there are four types of failures that may occur during an adhesive joint test:

- Type 1: Adhesive failure is a failure at the interface between the adherent and the adhesive.
- Type 2: Cohesive failure occurs in the adhesive body, leaving part of the adhesive body on both substrates.
- Type 3: The combined failure is the one that presents partial zones with adhesive and cohesive fault in the overlap area. Substrate failure occurs when the bond between the adhesive and the substrate material is stronger than the internal strength of the substrate material. The latter type of failure is common in the adhesion of composite materials.
- Type 4: In substrate failure, the original materials fail away from the joint or near the junction area when the original materials detach. Another expected failure mode is adhesive cohesion failure, in which the adhesive splits into the bonding area but remains firmly attached to both substrates. Adhesive failure, where adhesions are released from substrate materials, is considered a weak bond and is generally unacceptable.



Source: Figure drawn by the autor.

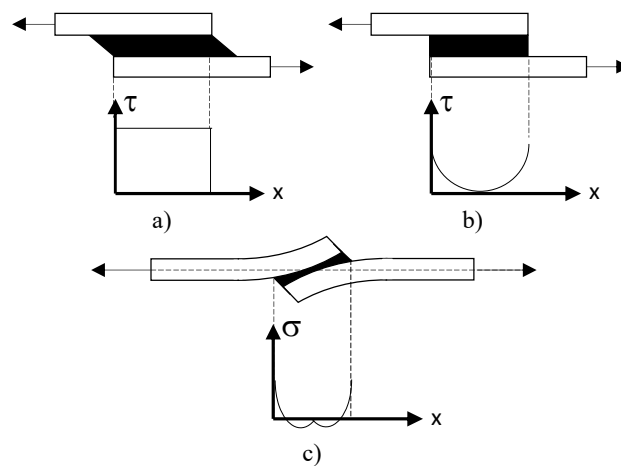
Fig. 3. Most common failure modes in adhesive testing.

An initial and simplified approach is supposed that the axial or tensile load V is exerted longitudinally to one of substrates (base material to be joined) and that is converted into a uniform shear stress

($\tau_{prom} = V/A$) through the contact area of the adhesive and subsequently again this shear stress is converted into another longitudinal force on the opposite substrate as schematized in the Figure 4.a. In fact, the substrates are not rigid and deforms closer to their final load, as shown in the Figure 4.b. Thus the shear stress generated is not uniform but grows at the ends of the overlap, as illustrated in figure 4.c.

Finally, the shear stress present in the adhesive by the off-center or non-collinear load causes a bending in a substrate. In addition to the non-uniform distribution of the shear stress, this flexion increases the transverse stresses, sometimes the well-known peeling stress (peeling) is formed, or at other times called cleavage or cleavage stress, figure 4.d.

Because of the chemical, mechanical, thermal, and viscoelastic processes involved in adhesive joints, the strength evaluated not only corresponds to the body of the adhesive, but to the effects of the substrates and bonding interfaces, which is why adhesive bonding is considered a complex system.



Source: Figure drawn by the autor.

Fig. 4. Stress distributions in the adhesive of a single overlap joint, a) Scheme of average uniform shear stress on the adhesive, b) Scheme of non-uniform shear stress on the adhesive, c) Scheme of peeling stress on the adhesive.

An analytical solution for simplified configuration was derived by¹² in 1944; however, it was not until 1989 that¹⁴ developed a simplified design equation as a model corrected to the Volkersen substrate model by introducing the Poisson module.

$$\tau = \frac{P\omega \cosh(\omega x)}{2b \sinh\left(\frac{\omega l}{2}\right)} + \left(\frac{t_t - t_b}{t_t + t_b}\right) \left(\frac{\omega l}{2}\right) \left(\frac{\sinh(\omega x)}{\cosh\left(\frac{\omega l}{2}\right)}\right) \quad \text{Equation 2}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{G}{Et_t t_a} \left(1 + \frac{t_t}{t_b}\right)} \quad \text{Equation 3}$$

Where τ is the shear stress on the adhesive body, P is the force applied to the inner adherend, the reciprocal of ω is the shear-lag distance as a measure of how quickly the load is transferred from one adherent to the other, x is the distance measured from the middle of the overlap length, G is the adhesive shear module, E is the elastic modulus of the substrate, t_a is the adhesive thickness, t_a is the thickness of above substrate, t_b is the thickness of below substrate, ν is the Poisson's ratio.

Shear modulus G is directly proportional to the shear stress at the adhesive body. That is the reason which changes in the shear modulus can be a measure of the damage or integrity of the joint system. Taking into account the damage assessment model based on the stiffness change proposed^{3,4} and⁵ the percentage of damage index ($\%ID^G$) can be determined by analogy with the stiffness loss principle for one-way shear static load with the equation:

$$\%ID^G = \left| 1 - \frac{G_V}{G_o} \right| \times 100 \quad \text{Equation 3}$$

Where G_V is the shear module (quasi static) after increased uniaxial load and G_o is the initial shear module in pristine condition.

COUPONS MANUFACTURING

The strength of adhesive bond specimens is sensitive to the repeatability in the manufacturing process and variability of some of the properties such as adhesive thickness, overlap length, surface preparation, adhesive mixing properties and proportions, adhesive application and curing.

Due to the last, a specimen manufacturing process was established based on ASTM D1002–10 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), adhesive manufacturer recommendations.^{15, 16, 17}

A special steel mold was manufactured to have repeatability and accuracy at the specimen geometry, reliability and parameter deviation control like adhesive preparation and application, wetting, uniform pressure, adhesive thickness, overlapping area, geometry, uniform heat treatment and easy demolding and cleaning previously to the test. Figure 5 shows the special mold, and the final SLJ specimens. There was manufactured 20 SLJ specimens and tested at quasistatic conditions.

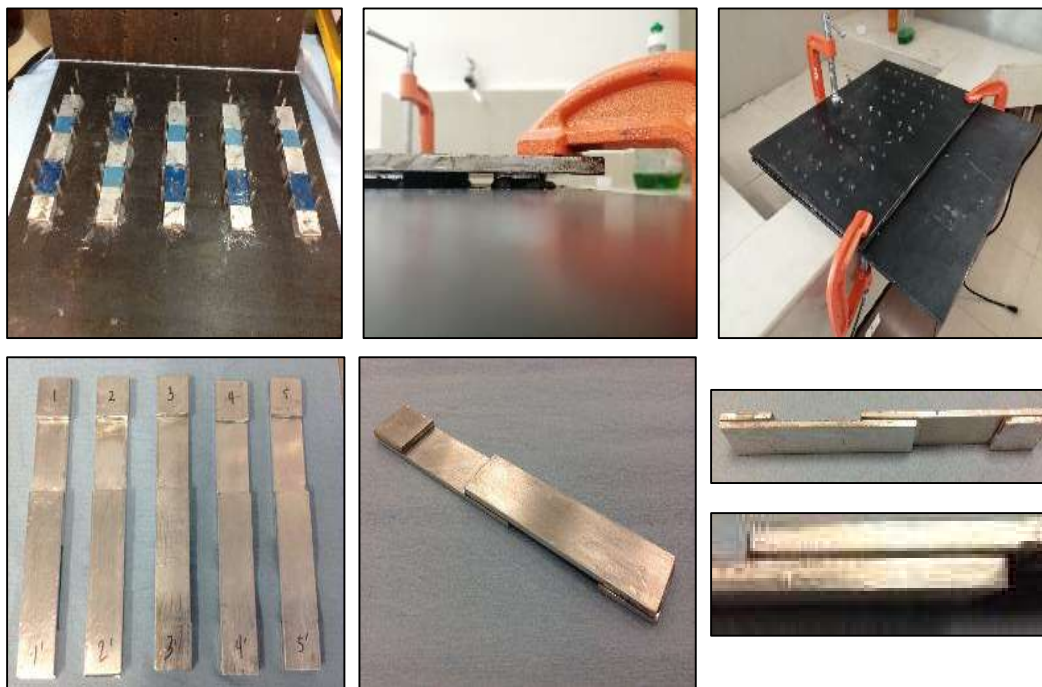


Fig. 5. Special steel mold design, manual grips for uniform pressure and final SLJ specimens.

SETUP FOR SHEAR STRESS MEASUREMENTS IN ADHESIVE JOINTS

To perform an assessment of damage in an adhesive joint the experimental setup of Quasi-static unidirectional shear condition or QSSC was established.

Quasi-static unidirectional shear. A Shimadzu AGS-X universal machine was used to carry out the traction cutting test of the single overlap joint specimens with reference to ASTM D1002–10 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal) (figure 6). A quasi-static load was applied with a speed of 1,270 mm/min for a maximum load range of 10,000 N. Simultaneously, the Digital Image Correlation Technique was applied mapping the shear strain near the border between the adhesion zone to capture the deformations between the adhesive and adherent and getting in the post-processing stage the shear stress-strain curve (τ - γ) and the shear modulus (G , MPa) in “without damage” or “pristine” condition.

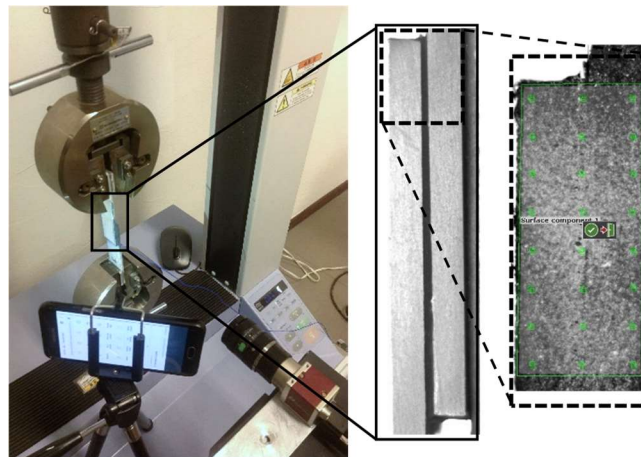


Fig. 6. Experimental setup for the SLJ test under quasi-static shear load (left), zoom at the lapping zone (center) and the measure area dashed by a contrast background needed by the DIC technique (right).

Digital Image Correlation. A high-resolution camera Allied Vision, Model Mako U503-B with 5 megapixels was used along with a 50 mm lens and extension tubes. Due to the high magnification and achieving a high accuracy approach, a support mounted on remote-controlled linear guides was used, with small linear displacements for each servomotor revolution. The configuration achieved a total of 940 pixels over the width of the joint, i.e. a resolution of 0.0072 mm/pixel, enough to accurately measure both deformations and displacements.

The measurement area of the adhesive joint with a width of 6.8 mm, with the dark contrast pattern and bright random spotting which allows to obtain the deformation and displacement vectors in the subspace that is selected for analysis. In addition, the resolution measured between the two reference points indicated as point 1 and 2, which is 940.93 pixels/6.8 mm, i.e. 138 pixels/mm, is displayed.

The cameras were connected to a Dell Precision 3510 Workstation for sequential image capture and synchronized with the data acquisition rate of the 10 kN Shimadzu AGX-10 universal machine. Frame rate image acquisition was programmed to 1 image per second for static testing. In a complete case, the camera was synchronized at a speed of 5 images per second to capture a complete static test sequence.

EXPERIMENTAL RESULTS

There is a huge amount of information derived from the experimentation, that's because we present the results for one specimen only. The average results of the L3M57140N specimen are shown in figure 7 where the average maximum shear stress is $\tau_{max\ prom}=9.32\pm2.86\ MPa$ and the average maximum shear strain is $\gamma_{max\ prom}=0.07\pm0.02\ rad$.

The average stress-strain shear curve does not have a linear or proportional zone as in other materials, so the literature suggests that the yield shear stress and therefore the shear modulus can be obtained by the offset yield method^{18, 19} or by the method of the derivatives of the stress-strain shear curve.²⁰ $\tau_{av}=4.12\ MPa$ for and $\gamma_{av}=0.01\ rad$, so the shear modulus is $G_{av\ prom}=343.17\ MPa$.

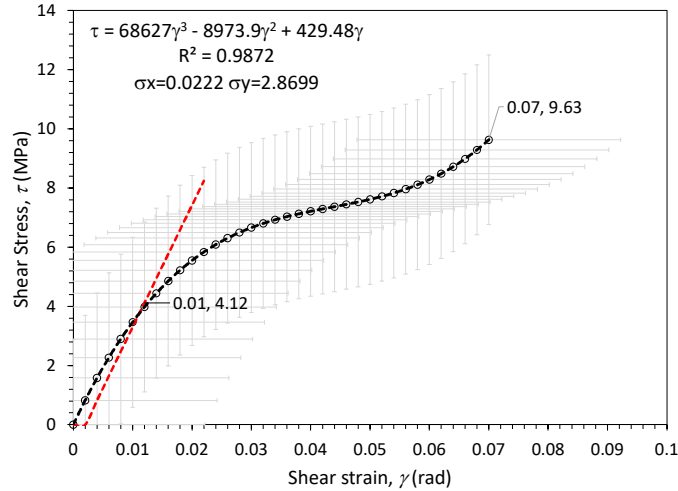


Fig. 7. Average curve for the 4 points of the adhesion line (at 1, 2, 3 and 4 mm).

Figure 8 shows the change behavior of the shear modulus G vs shear stress t obtained by the derivative method for the shear stress-strain curve. It is observed that as the adhesive is stressed, the shear module shows a tendency to decrease, i.e. that the shear modulus suffers a degradation or a loss of stiffness in the adhesive.

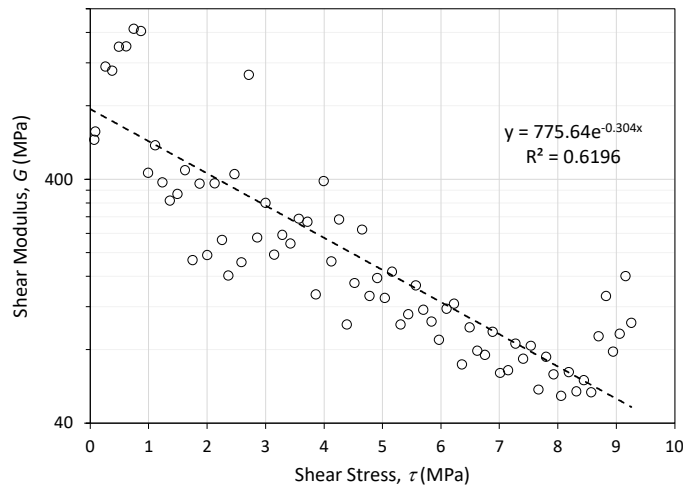


Fig. 8. Variation of the shear modulus G with respect to the average shear strain.

Figure 9 shows the percentage of damage rate based on the change of the quasi-static shear modulus $\%ID^G$, obtained from the digital correlation measurements of images and the derivative of the curve L5M4205KN. The figure shows that the percentage of damage rate $\%ID^G$ is increased to 75.2% for a slight increase or load ratio r_v of 0.01 in quasi-static condition. Subsequently, the $\%ID^G$ decreases to

29.2% for load ratio r_V of 0.08. After that, the $\%ID^G$ is greatly increased up to 81.8%, to remain at values around 97% until the final failure.

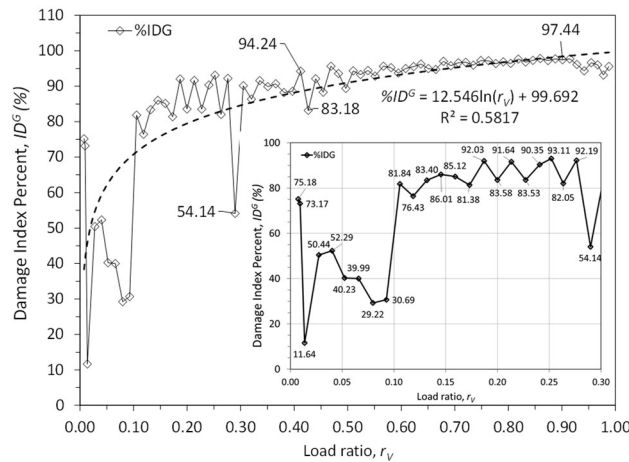


Fig. 9. Percent damage rate based on changes in the quasi-static shear modulus ID^G (%) vs the load ratio, r_V .

DISCUSSION

As mentioned by Wahab,¹⁶ “There are difficulties associated with modeling the nucleation of a crack and the ability to control and detect the initiation phase”. However, in this work, it was possible with unexpensive tools and precise technical references have repeatability and accuracy at the specimen geometry, reliability and parameter deviation control like adhesive preparation and application, wetting, uniform pressure, adhesive thickness, overlapping area, geometry, and uniform heat treatment for the adhesive curing.

In the other hand, we can probe that shear modulus evolves against time according with the application of quasi-static load rate. This effect is identified as the Loss Stiffens or Shear Modulus Loss and its derivative respecting time is a possible signal of damage evolve and it can be assessed in function of time, with the shear load rate or even the shear strain rate. This behavior has been established at the literature even for numerical methods as the elasticity bi-lineal model, however there is not many results of its variations with adhesives and shear loading conditions.

It was found that the quasi-static shear modulus G has a nonlinear variation, reaching a maximum level within the first 10% of the shear stress range and progressively decreases as the stress and strain level increases. This behavior was observed for all the points analyzed on the adhesion line.

Last may be due to the viscoelastic behavior of the epoxy adhesive as a polymeric resin the shear modulus behavior can be interpreted as a degradation of the quasi-static elastic properties of the adhesive because internal molecular chains acquire a forced resorting in the direction of the shear load. These polymeric chains alignment tends to remain in time because degrees of freedom of adjacent molecules have been modified and therefore exhibit non-elastic behavior. The degradation of the quasi-static shear modulus is directly related to the viscoelastic creep and relaxation phenomena and these in turn the thermo-elastic properties of the adhesive.

Regarding the percentage of damage rate ($\%ID^G$) based on the variation of the shear modulus shows a nonlinear behavior close to a logarithmic function of the form $y = A + B \ln(x)$ where A and B can be calculated through the method of least squares. This percent index of damage ($\%ID = A + B \ln(r_V)$) is proposed as a predictive model of damage because can provide early information about damage evolution under quasi-static load for the adhesive at the single lap joint.

CONCLUSION

It is possible to assess with high accuracy and reliability the evolve of damage in SLJ under shear load, but more measures should be performed to reduce uncertainties derived from materials properties, preparation process, human manipulation vias, postprocessing procedures, etc.

A different joint configuration should be tested with another physical conditions like variations at the load speed, types of loads (cyclic, impact, random) and different environmental conditions. When all these conditions have been analyzed the following steps should be testing real parts and components like aerospace or automotive components and after that testing with structures at scale and with real dimensions. The experimentation using large scale components using design of experiments could be expensive, that is why it is very important the continuous research in this field using coupon level samples.

Techniques like Digital Image Correlation can provide a lot of information that can be used to validate theoretical models and computational algorithms about damage progress. DIC have its enough research field, however, is a powerful help to visualize the strain-stress distribution in a body.

Finally theoretical models can be fitted as a possible average behavior of the damage inside the adhesive body during the shear load application. This is a little step focused to know the early damage stages evolution and understand the hidden behaviors or phenomena that can primarily affect the adhesive joint both strength and safety, after affect components and finally a compromise a safety application.

ACKNOWLEDGMENT

Thanks to the PAICYT 2021 program of the UANL for financing part of this project.

REFERENCIAS

1. K. Worden y J. M. Dulieu-Barton, «An Overview of Intelligent Fault Detection in Systems and Structures,» *Journal of Structural Health Monitoring*, vol. 3, n° 1, pp. 85-98, 2004.
2. G. Z. Voyiadjis, P. I. Kattan y M. A. Yousef, «Section I Continuum Damage Mechanics Fundamentals,» de *Handbook of Damage Mechanics*, vol. I, New York, Springer, 2015, pp. 1-42.
3. R. Balieu, F. Lauro, B. Bennani, G. Haugou, F. Chaari, T. Matsumoto y E. Mottola, «Damage at high strain rates in semi-crystalline polymers,» *International Journal of Impact Engineering*, pp. 1-8, 2015.
4. J. Lemaitre, «A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture,» *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 107, pp. 84-89, 1985.
5. C. Basaran, S. Nie, J. Gomez, E. Gunel, S. Li, M. Lin, H. Tang, C. Yan, W. Yao y H. Ye, «23. Thermodynamics Theory for Damage Evolution in Solids,» de *Handbook of Damage Mechanics, Nano to Macro Scale for Materials*, New York, Springer Science+Business Media, 2015, pp. 721-762.
6. M. M. A. Wahab, «Fatigue in Adhesively Bonded Joints: A Review,» *ISRN Materials Science*, vol. 2012, 2012.
7. M. Banea y L. F. M. da Silva, «Adhesively bonded joints in composite materials: an overviwe,» *Part L: J. Materials: Design and Applications*, vol. 223, 2009.
8. V. Krishnaraj, R. Zitoune y J. P. Davim, *Drilling of Polymer-Matrix Composites*, Springer, 2013.
9. D. M. Antunes, «Understanding failure of adhesively bonded joints,» pp. 1-10, 2015.

10. C. de Sousa, R. Campilho, E. Marques, M. Costa y L. da Silva, «Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints,» *Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 231, n° 1-2, pp. 210-223, 2016.
11. O. Volkersen, «Die Niekraftverteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschnitten,» *Luftfahrtforschung*, vol. 15, pp. 41-47, 1938.
12. M. Goland y E. Reissner, «The Stresses in Cemented Joints,» *Journal of Applied Mechanics*, vol. 11, pp. A17-A27, 1944.
13. L. J. Hart-Smith, «Adhesive-Bonded Single-Lap Joints,» Douglas Aircraft Co., NASA Langley Report CR 112236., 1973.
14. D. Bigwood y A. Crocombe, «Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints,» *International Journal of Adhesion and Adhesives*, pp. 229-242, 1989.
15. ASTM International, *ASTM D2651-01(2016), Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding*, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States: ASTM International, 2016.
16. P. Walker y W. H. Tarn, *Handbook of Metal Etchants*, Boca Raton, FL: CRC Press, 1991.
17. ASTM International, *ASTM D1002-10 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States: ASTM International, 2010.
18. A. Lenwari, P. Albrecht y M. Albrecht, «SED Method of Measuring Yield Strength of Adhesives and Other Materials,» *Journal of ASTM International*, vol. 2, n° 10, pp. 1-18, 2005.
19. ASTM International, *ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
20. R. M. Christensen, «Observations on the Determination of Yield Stress,» *Acta Mechanica*, vol. 196, pp. 239-244, 2008.
21. H. Khoramishad, A. Crocombe, K. Katnam y I. Ashcroft, «Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model,» *International Journal of Fatigue*, vol. 32, pp. 1146-1158, 2010.
22. G. Barenblatt, «Equilibrium cracks formed on a brittle fracture,» *Doklady Akademii Nauk Sssr*, vol. 127, n° 1, pp. 47-50, 1959.
23. G. Barenblatt, «The mathematical theory of equilibrium cracks formed in brittle fracture,» *Armed Services Technical Information Agency*, pp. 1-109, 1962.
24. A. Griffith, «The Phenomena of Ruptures in Fluids and Solids,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 221, pp. 163-198, 1921.
25. 3M Company, *3M Scotch-Weld Epoxy Adhesive EC-2216 B/A, Technical Datasheet*, St. Paul, MN, USA, 2009.

Realización electrónica de sistemas caóticos:

Parte 1, analógicos cuadráticos

Francisco Antonio Rodríguez Cruz, César de Jesús Chacón Rendón,

Angel Rodriguez-Liñan

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

franciscoantoniordez@hotmail.com, ces.chre98@gmail.com, angel.rodriguezln@uanl.edu.mx

RESUMEN

Algunas aplicaciones de sistemas caóticos requieren su implementación mediante electrónica analógica o digital. En esta primera parte, se resume la realización electrónica de algunos sistemas caóticos más conocidos con no linealidades cuadráticas, mediante circuitos con multiplicadores y amplificadores operacionales. Se demuestra la equivalencia de sus variables y componentes electrónicos con las variables y parámetros normalizados de los modelos matemáticos caóticos. Además, se compara el comportamiento de cada circuito con simulaciones de sus modelos matemáticos establecidos. En las siguientes partes de este trabajo, se mostrará la realización electrónica de sistemas caóticos lineales por tramos e implementación en dispositivos digitales.

PALABRAS CLAVE

Sistemas caóticos, Computación analógica, Amplificadores operacionales, No linealidad cuadrática.

ABSTRACT

Some applications of chaotic systems require their implementation through analog or digital electronics. In this first part, the electronic realization of some well-known chaotic systems with quadratic nonlinearities is summarized, by means of circuits with multipliers and operational amplifiers. The equivalence of its variables and electronic components with the normalized variables and parameters of chaotic mathematical models is demonstrated. In addition, the behavior of each circuit is compared to simulations of their mathematical models. In the following parts of this work, the electronic realization of piecewise linear chaotic systems and implementation in digital devices will be shown.

KEYWORDS

Chaotic systems, Analog computation, Operational amplifiers, Quadratic nonlinearity.

INTRODUCCIÓN

Un sistema caótico es un sistema dinámico con varias características, entre las principales está su sensibilidad a las condiciones iniciales, ya que al variarlas, un sistema caótico presenta un resultado completamente diferente al obtenido con las condiciones iniciales originales, pero siempre trazando un patrón característico. Los sistemas caóticos continuos de orden entero y dimensión finita pueden modelarse mediante ecuaciones diferenciales ordinarias y los sistemas caóticos discretos pueden describirse con ecuaciones en diferencias iterativas. Usualmente el comportamiento de sus variables con respecto al tiempo parece errático, además de extremadamente difícil de predecir después de cierto horizonte de tiempo. Por ejemplo, es muy difícil predecir (o imposible) el comportamiento atmosférico para horizontes temporales mayores a varios días o semanas¹. Sin embargo, si se estudia el comportamiento de dichas variables en el espacio de fase en lugar de en el espacio temporal, el comportamiento de las variables luce más repetitivo e interpretable, describiendo una trayectoria espacial característica, a la que se denomina atractor caótico. Los sistemas, señales y atractores caóticos han sido estudiados en diversos fenómenos de la naturaleza y sociedad, así como para aplicaciones en muchas disciplinas de la ingeniería. Por ejemplo, en los fenómenos meteorológicos, en biología en crecimiento poblacional, en física para el estudio de sincronización, para el estudio de la turbulencia en fluidos, se presentan en sistemas mecánicos y circuitos electrónicos, se proponen en sistemas de comunicación para el cifrado de señales, entre otros casos donde se estudian los atractores caóticos²⁻⁸. Algunas de estas aplicaciones requieren la implementación de los sistemas caóticos mediante circuitería electrónica analógica y otras de forma digital.

ANTECEDENTES

Desde hace algunas décadas, se han creado circuitos analógicos que reproducen algunos atractores de sistemas caóticos algebraicamente simples, como el sistema de Rössler^{9,10}, que es un conjunto de tres ecuaciones diferenciales donde sólo se presenta una no linealidad cuadrática (producto multiplicativo). También se ha implementado electrónicamente el sistema de Lorenz, que es un sistema de tres ecuaciones diferenciales con sólo dos productos multiplicativos que, aunque surgió a partir del fenómeno de convección en la atmósfera, es aplicado en telecomunicaciones² y estudiado en sincronización de caos¹¹. De este sistema se derivan otros circuitos similares, como el de Chen y el de Lü¹²⁻¹⁴. Los sistemas caóticos de Malasoma son de las estructuras más simples, que sólo contienen cada uno un término cuadrático o producto multiplicativo¹⁵. Aunque parece fácil la implementación o realización de sistemas caóticos con circuitería analógica, se requiere proponer mallas y ramas de componentes que permitan reconstruir cada una de las ecuaciones diferenciales que describen a los sistemas caóticos, así como elegir adecuadamente el valor comercial de los componentes electrónicos; ya que por su naturaleza caótica, estos circuitos son muy sensibles a variaciones paramétricas y estructura en las ecuaciones de su dinámica. Por ello, es conveniente conocer el modelo matemático del circuito y la relación de sus variables con las ecuaciones diferenciales del sistema caótico, para hacer análisis, aplicaciones y control de sus patrones de oscilación basados en su dinámica. Sin embargo, en muchos casos reportados en la literatura no se explica con detalle cómo se construye cada una de las ecuaciones diferenciales de los circuitos, ni cómo son equivalentes a los sistemas caóticos adimensionales reportados. Además, no suelen explicar cómo seleccionar el valor de los componentes electrónicos que les permitan seguir siendo equivalentes al sistema caótico.

CONTRIBUCIÓN

En este trabajo se resume la realización de varios de los sistemas caóticos más conocidos, mediante circuitos electrónicos analógicos y digitales, que permiten generar sus atractores característicos. Además, se demuestra la equivalencia entre sus variables y componentes electrónicos con las variables y parámetros adimensionales de los modelos matemáticos caóticos. También, se propone un circuito unificado para los sistemas de Lorenz, Chen y Lü. Para mayor detalle, este trabajo se ha organizado en tres partes: En la primera, se ilustra la realización y modelado de varios sistemas caóticos más conocidos con no linealidades cuadráticas, utilizando multiplicadores y amplificadores operacionales (op-amp, por sus siglas en inglés). En la segunda parte, se mostrará la realización de sistemas caóticos mediante circuitos analógicos lineales por tramos, así como el mapeo entre magnitudes eléctricas y variables de los modelos caóticos adimensionales. En la tercera parte, se aplica discretización en el tiempo a sistemas caóticos, para su implementación digital en la plataforma Arduino y adquisición de datos. En cada parte, se ilustran resultados mediante simulaciones e implementación de circuitos.

REALIZACIÓN CON CIRCUITOS ANALÓGICOS

En esta sección, se resume la realización electrónica de algunos sistemas caóticos utilizando resistores, capacitores, multiplicadores de voltaje y op-amp en las configuraciones conocidas como amplificador inversor, amplificador no inversor, sumador inversor, restador inversor e integrador¹⁶. También se presenta el mapeo entre las magnitudes eléctricas de dichos componentes y las variables de sus modelos caóticos adimensionales.

Sistemas de Lorenz, Lü y Chen

Un sistema caótico unificado¹⁴ es descrito por

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = (25\gamma + 10)(x_2 - x_1) \\ \frac{dx_2}{d\tau} = (28 - 35\gamma)x_1 + (29\gamma - 1)x_2 - x_1x_3 \\ \frac{dx_3}{d\tau} = x_1x_2 - \frac{(\gamma+8)}{3}x_3 \end{cases} \quad (1)$$

donde τ es una variable normalizada de tiempo, x_1 , x_2 y x_3 son las variables de estado y $\gamma \in [0,1]$. Cuando $\gamma \in [0,0.8)$, el sistema (1) coincide con el sistema caótico de Lorenz, que se representa típicamente¹ como

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = \sigma(x_2 - x_1) \\ \frac{dx_2}{d\tau} = \rho x_1 - x_2 - x_1 x_3 \\ \frac{dx_3}{d\tau} = x_1 x_2 - b x_3 \end{cases} \quad (2)$$

con σ , ρ y b como parámetros constantes. Si $\gamma=0.8$, el sistema (1) coincide con el sistema caótico de Lü, que se representa típicamente¹⁷ como

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = a(x_2 - x_1) \\ \frac{dx_2}{d\tau} = c x_2 - x_1 x_3 \\ \frac{dx_3}{d\tau} = x_1 x_2 - b x_3 \end{cases} \quad (3)$$

con a , c y b como parámetros constantes. Si $\gamma \in (0.8, 1]$, el sistema (1) coincide con el sistema caótico de Chen, que se representa típicamente¹⁸ como

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = a(x_2 - x_1) \\ \frac{dx_2}{d\tau} = (c - a)x_1 + c x_2 - x_1 x_3 \\ \frac{dx_3}{d\tau} = x_1 x_2 - b x_3 \end{cases} \quad (4)$$

con a , c y b como parámetros constantes. Se propone el circuito de la figura 1 como una misma realización electrónica de los sistemas (2), (3) y (4), donde $R_1, R_2, \dots, R_{14}$ son resistencias, C_1, C_2 y C_3 son capacitancias, A_1 y A_2 son ganancias de los multiplicadores de voltaje, S_0 y S_1 son selectores, v_1, v_2 y v_3 son los voltajes de salida de los op-amp U1B, U2B y U3B, respectivamente.

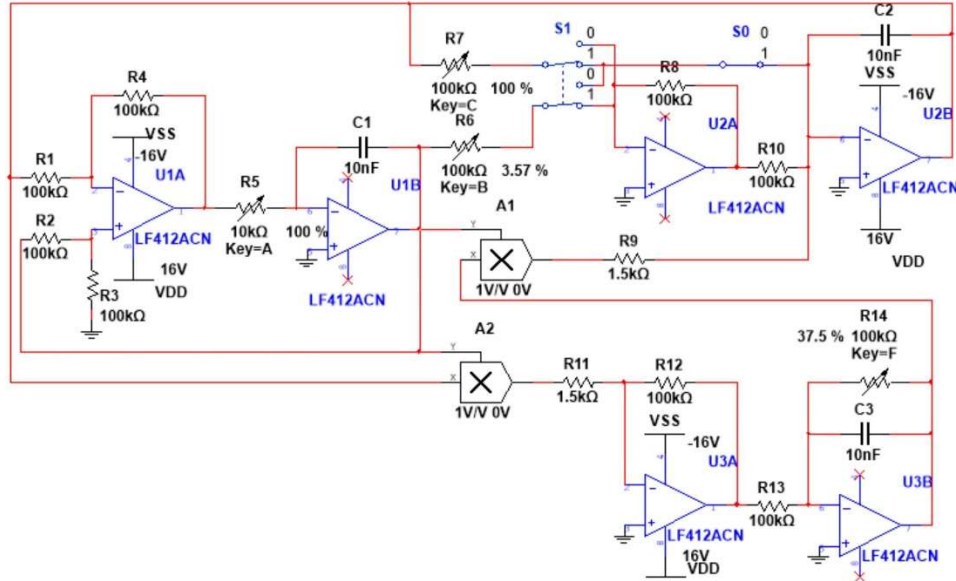


Fig. 1. Realización electrónica unificada de los sistemas Lorenz, Lü y Chen.

Para demostrar la equivalencia del circuito de la figura 1 con los sistemas (2), (3) y (4), se realiza el siguiente análisis:

Se inicia con el op-amp U1A, si $R_1 = R_2$ y $R_3 = R_4$, entonces su voltaje de salida es

$$V_{1A} = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \left(1 + \frac{R_4}{R_1} \right) v_1 - \left(\frac{R_4}{R_1} \right) v_2 = \left(\frac{R_4}{R_1} \right) (v_1 - v_2)$$

Para el op-amp U1B, su voltaje de salida es

$$v_1 = -\frac{1}{R_5 C_1} \int V_{1A} dt = \frac{1}{R_1 C_1} \int \left(\frac{R_4}{R_5} \right) (v_2 - v_1) dt \quad (5)$$

donde t es la variable de tiempo. Para el op-amp U2A, dependiendo del estado del selector $S_1 \in \{0,1\}$, su voltaje de salida es

$$V_{2A} = -S_1 \left(\frac{R_8}{R_6} \right) v_1 - (1 - S_1) \left(\frac{R_8}{R_7} \right) v_2$$

Para el op-amp U2B, si $R_8 = R_{10}$, dependiendo del estado de los selectores $S_0 \in \{0,1\}$ y $S_1 \in \{0,1\}$, se cumple

$$\begin{aligned} \frac{V_{2A}}{R_{10}} + \frac{A_1 v_1 v_3}{R_9} + S_0 \left(S_1 \frac{v_2}{R_7} + (1 - S_1) \frac{v_1}{R_6} \right) + C_2 \frac{dv_2}{dt} &= 0 \\ \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{C_2} \left(-\frac{V_{2A}}{R_{10}} - \frac{A_1 v_1 v_3}{R_9} - S_0 \left(S_1 \frac{v_2}{R_7} + (1 - S_1) \frac{v_1}{R_6} \right) \right) \\ \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{C_2} \left(S_1 \left(\frac{R_8}{R_6 R_{10}} \right) v_1 + (1 - S_1) \left(\frac{R_8}{R_7 R_{10}} \right) v_2 - \frac{A_1 v_1 v_3}{R_9} - S_0 S_1 \frac{v_2}{R_7} - S_0 (1 - S_1) \frac{v_1}{R_6} \right) \\ \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{C_2} \left([S_1 - S_0(1 - S_1)] \left(\frac{1}{R_6} \right) v_1 + [(1 - S_1) - S_0 S_1] \left(\frac{1}{R_7} \right) v_2 - \frac{A_1 v_1 v_3}{R_9} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Para el op-amp U3A, el voltaje de salida es

$$V_{3A} = -\left(\frac{R_{12}}{R_{11}} \right) A_2 v_1 v_2$$

Para el op-amp U3B, se cumple

$$\begin{aligned} \frac{V_{3A}}{R_{13}} + \frac{v_3}{R_{14}} + C_3 \frac{dv_3}{dt} &= 0 \\ \frac{dv_3}{dt} &= \frac{1}{C_3} \left(-\frac{V_{3A}}{R_{13}} - \frac{v_3}{R_{14}} \right) = \frac{1}{C_3} \left(\left(\frac{R_{12}}{R_{11} R_{13}} \right) A_2 v_1 v_2 - \frac{v_3}{R_{14}} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Por lo tanto, partiendo de las ecuaciones (5), (6) y (7), el circuito electrónico de la figura 1 puede modelarse por

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{R_1 C_1} \left(\frac{R_4}{R_5} \right) (v_2 - v_1) \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R_{10} C_2} \left([S_1 - S_0(1 - S_1)] \left(\frac{R_{10}}{R_6} \right) v_1 + [(1 - S_1) - S_0 S_1] \left(\frac{R_{10}}{R_7} \right) v_2 - \left(\frac{A_1 R_{10}}{R_9} \right) v_1 v_3 \right) \\ \frac{dv_3}{dt} = \frac{1}{R_{13} C_3} \left(\left(\frac{A_2 R_{12}}{R_{11}} \right) v_1 v_2 - \left(\frac{R_{13}}{R_{14}} \right) v_3 \right) \end{cases} \quad (8)$$

El modelo (8) es equivalente al sistema caótico de Lorenz adimensional (2), bajo las condiciones y mapeos del tiempo, estados y parámetros dados por $\tau = \frac{1}{R_1 C_1} t$, $\frac{v_1}{x_1} = \frac{v_2}{x_2} = \frac{v_3}{x_3} = M$, $M = \frac{R_9}{A_1 R_{10}} = \frac{R_{11}}{A_2 R_{12}}$, $\sigma = \frac{R_4}{R_5}$, $\rho = \frac{R_{10}}{R_6}$, $b = \frac{R_{13}}{R_{14}}$, $C_1 = C_2 = C_3$, $R_1 = R_2 = R_7 = R_8 = R_{10} = R_{13}$, $R_3 = R_4$, $S_0=1$ y $S_1=1$.

El modelo (8) es equivalente al sistema caótico de Lü adimensional (3), bajo las condiciones y mapeos del tiempo, estados y parámetros dados por $\tau = \frac{1}{R_1 C_1} t$, $\frac{v_1}{x_1} = \frac{v_2}{x_2} = \frac{v_3}{x_3} = M$, $M = \frac{R_9}{A_1 R_{10}} = \frac{R_{11}}{A_2 R_{12}}$, $a = \frac{R_4}{R_5}$, $b = \frac{R_{13}}{R_{14}}$, $c = \frac{R_{10}}{R_7}$, $C_1 = C_2 = C_3$, $R_1 = R_2 = R_8 = R_{10} = R_{13}$, $R_3 = R_4$, el valor de R_6 no importa, $S_0=0$ y $S_1=0$.

El modelo (8) es equivalente al sistema caótico de Chen adimensional (4), bajo las condiciones y mapeos del tiempo, estados y parámetros dados por $\tau = \frac{1}{R_1 C_1} t$, $\frac{v_1}{x_1} = \frac{v_2}{x_2} = \frac{v_3}{x_3} = M$, $M = \frac{R_9}{A_1 R_{10}} = \frac{R_{11}}{A_2 R_{12}}$, $a = \frac{R_4}{R_5}$, $b = \frac{R_{13}}{R_{14}}$, $c = \frac{R_{10}}{R_7}$, $(c - a) = \frac{R_{10}}{R_6}$, $C_1 = C_2 = C_3$, $R_1 = R_2 = R_8 = R_{10} = R_{13}$, $R_3 = R_4$, $S_0=1$ y $S_1=0$.

$$V_{2A} = -\frac{R_9}{R_7} V_{CC} - \frac{A_1 R_9}{R_8} v_1 v_3 + \frac{R_9 R_{12}}{R_{13} R_{11}} v_3$$

Finalmente, el voltaje de salida del op-amp U2B es

$$v_3 = \frac{1}{R_{10} C_3} \int \left(\frac{R_9}{R_7} V_{CC} + \frac{A_1 R_9}{R_8} v_1 v_3 - \frac{R_9 R_{12}}{R_{13} R_{11}} v_3 \right) dt \quad (12)$$

Por lo tanto, partiendo de las ecuaciones (10), (11) y (12), si $R_1 = R_3$, $R_5 = R_6$, el circuito electrónico de la figura 1 puede ser modelado por

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{R_5 C_1} (-v_2 - v_3) \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R_4 C_2} \left(v_1 + \frac{R_3}{R_2} v_2 \right) \\ \frac{dv_3}{dt} = \frac{1}{R_{10} C_3} \left[\frac{R_9}{R_7} V_{CC} + v_3 \left(\frac{A_1 R_9}{R_8} v_1 - \frac{R_9 R_{12}}{R_{13} R_{11}} \right) \right] \end{cases} \quad (13)$$

El modelo (13) es equivalente al sistema caótico de Rössler adimensional (9), bajo las condiciones y mapeos del tiempo, estados y parámetros dados por $\tau = \frac{1}{R_5 C_1} t$, $\frac{v_1}{x_1} = \frac{v_2}{x_2} = \frac{v_3}{x_3} = M$, $M = \frac{R_8}{A_1 R_9}$, $a = \frac{R_3}{R_2}$, $b = \frac{R_9 V_{CC}}{R_7 M}$, $c = \frac{R_9 R_{12}}{R_{13} R_{11}}$, $R_1 = R_3$, $R_4 = R_5 = R_6 = R_{10}$, $C_1 = C_2 = C_3$.

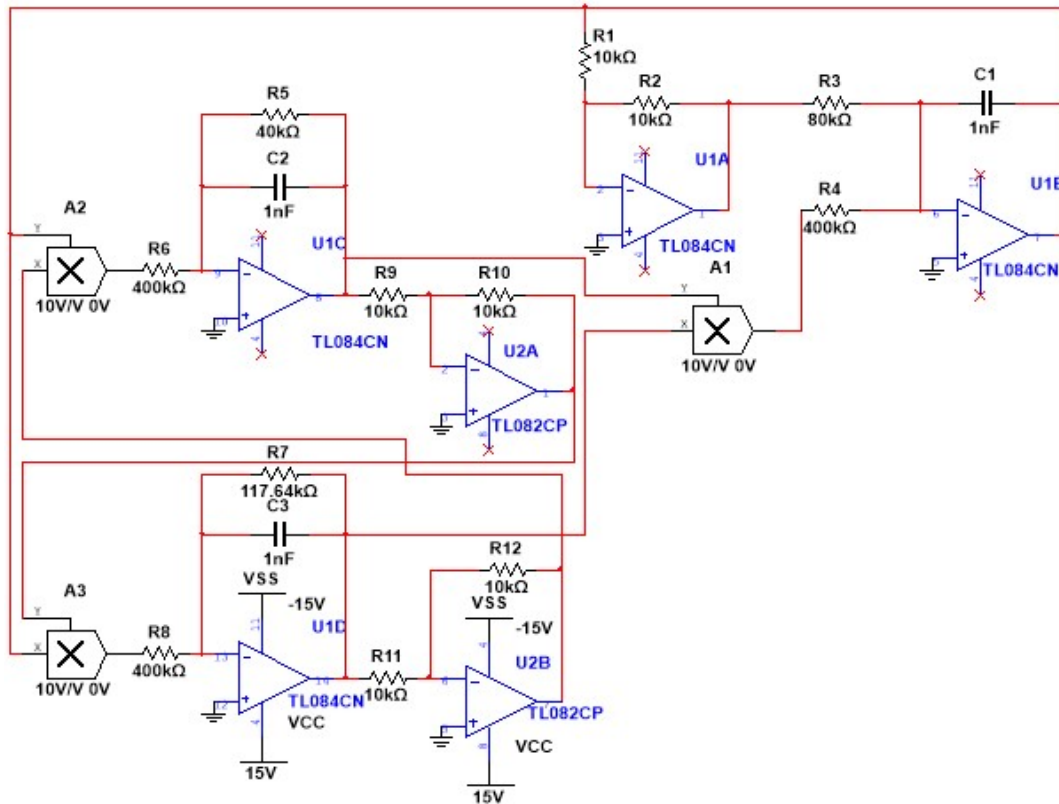


Fig. 3. Diagrama esquemático para la realización electrónica del sistema Liu-Chen.

Circuito de Liu-Chen

El sistema de Liu-Chen¹⁹ se representa por

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = ax_1 - x_2 x_3 \\ \frac{dx_2}{d\tau} = -bx_2 + x_1 x_3 \\ \frac{dx_3}{d\tau} = -cx_3 + x_1 x_2 \end{cases} \quad (14)$$

donde x_1 , x_2 y x_3 son las variables de estado, τ es una variable normalizada de tiempo, a , b y c son parámetros constantes. El sistema (14) tiene una realización electrónica por el circuito de la figura 3, donde $R_1, R_2, \dots, R_{12}$ son resistencias; C_1, C_2 y C_3 , capacitancias; A_1, A_2 y A_3 son ganancias de los multiplicadores de voltaje; v_1, v_2 y v_3 son los voltajes de salida de los op-amps U1B, U1C y U1D, respectivamente. V_{DD} y V_{SS} son los voltajes de alimentación de los amplificadores operacionales U1A, U1B, U1C, U1D, U2A y U2B. Para demostrar la equivalencia del circuito de la figura 3 con el sistema (14) se realiza el siguiente análisis:

El voltaje de salida del op-amp U1A es

$$V_{1A} = -\frac{R_2}{R_1} v_1$$

El voltaje de salida del op-amp U1B:

$$v_1 = \frac{1}{C_1} \int \left(-\frac{V_{1A}}{R_3} - \frac{A_1 v_2 v_3}{R_4} \right) dt = \frac{1}{C_1} \int \left(\frac{R_2 v_1}{R_1 R_3} - \frac{A_1 v_2 v_3}{R_4} \right) dt \quad (15)$$

donde t es la variable de tiempo. El voltaje de salida del op-amp U2B es

$$V_{2B} = -\frac{R_{12}}{R_{11}} v_3$$

Las corrientes en el nodo de la entrada inversora del op-amp U1C son:

$$\frac{A_2 v_1 V_{2B}}{R_6} + \frac{v_2}{R_5} + C_2 \frac{dv_2}{dt} = -\frac{A_2 R_{12} v_1 v_3}{R_6 R_{11}} + \frac{v_2}{R_5} + C_2 \frac{dv_2}{dt} = 0$$

El voltaje de salida del op-amp U1C es

$$v_2 = \frac{1}{C_2} \int \left(-\frac{v_2}{R_5} + \frac{A_2 R_{12} v_1 v_3}{R_6 R_{11}} \right) dt \quad (16)$$

El voltaje de salida del op-amp U2A es

$$V_{2A} = -\frac{R_{10}}{R_9} v_2$$

Las corrientes en el nodo de la entrada inversora del op-amp U1D es

$$\frac{A_3 v_1 V_{2A}}{R_8} + \frac{v_3}{R_7} + C_3 \frac{dv_3}{dt} = -\frac{A_3 R_{10} v_1 v_2}{R_8 R_9} + \frac{v_3}{R_7} + C_3 \frac{dv_3}{dt} = 0$$

El voltaje de salida del op-amp U1D es

$$v_3 = \frac{1}{C_3} \int \left(-\frac{v_3}{R_7} + \frac{A_3 R_{10} v_1 v_2}{R_8 R_9} \right) dt \quad (17)$$

Por lo tanto, las ecuaciones (15), (16) y (17) pueden describirse como el modelo

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{R_4 C_1} \left(\frac{R_2 R_4 v_1}{R_1 R_3} - A_1 v_2 v_3 \right) \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R_6 C_2} \left(-\frac{R_6 v_2}{R_5} + \frac{A_2 R_{12} v_1 v_3}{R_{11}} \right) \\ \frac{dv_3}{dt} = \frac{1}{R_8 C_3} \left(-\frac{R_8 v_3}{R_7} + \frac{A_3 R_{10} v_1 v_2}{R_9} \right) \end{cases} \quad (18)$$

El modelo (18) es equivalente al sistema caótico de Liu-Chen adimensional (14), bajo las condiciones y mapeos del tiempo, estados y parámetros dados por $\tau = \frac{1}{R_4 C_1} t$, $\frac{v_1}{x_1} = \frac{v_2}{x_2} = \frac{v_3}{x_3} = M$, $M = \frac{1}{A_1} = \frac{R_{11}}{A_2 R_{12}} = \frac{R_9}{A_3 R_{10}}$, $a = \frac{R_2 R_4}{R_1 R_3}$, $b = \frac{R_6}{R_5}$, $c = \frac{R_8}{R_7}$, $R_4 = R_6 = R_8$, $C_1 = C_2 = C_3$.

Circuito de Malasoma

J.M. Malasoma¹⁵ encontró una familia de sistemas caóticos algebraicamente muy simples y equivalentes entre sí, con una sola no linealidad cuadrática cada uno. Uno de esos sistemas es el siguiente:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = x_2 \\ \frac{dx_2}{d\tau} = x_3 \\ \frac{dx_3}{d\tau} = -\alpha x_3 - x_1 + x_1 x_2 \end{cases} \quad (19)$$

donde x_1 , x_2 y x_3 son las variables de estado, τ es una variable normalizada de tiempo, α es un parámetro constante. El sistema (19) tiene una realización electrónica por el circuito de la figura 4, donde R_1 , R_2 , ..., R_7 son resistencias; C_1 , C_2 y C_3 son capacitancias, A_1 es la ganancia del multiplicador; v_1 , v_2 y v_3 son los voltajes de salida de los op-amp U1A, U1B y U1C, respectivamente. V_1 y V_2 son los voltajes de alimentación de los amplificadores operacionales U1A, U1B, U1C y U1D.

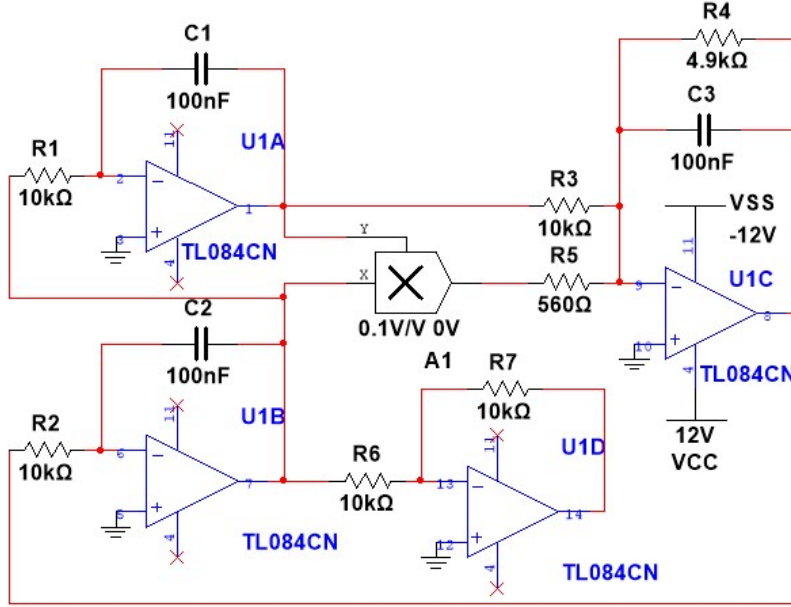


Fig. 4. Diagrama esquemático de una realización electrónica del sistema de Malasoma.

Para demostrar la equivalencia del circuito de la figura 4 con el sistema (19) se realiza el siguiente análisis:

El voltaje de salida del op-amp U1B es

$$V_{1B} = -\frac{1}{C_2} \int \left(\frac{1}{R_2} v_3 \right) dt$$

Si $R_6 = R_7$, el voltaje de salida del op-amp U1D es

$$v_2 = -\frac{R_7}{R_6} V_{1B} = \frac{1}{C_2} \int \left(\frac{1}{R_2} v_3 \right) dt \quad (20)$$

El voltaje de salida del op-amp U1A es

$$v_1 = \frac{1}{C_1} \int \left(-\frac{1}{R_1} V_{1B} \right) dt = \frac{1}{R_1 C_1} \int v_2 dt \quad (21)$$

Las corrientes en el nodo de la entrada inversora del op-amp U1C son

$$\frac{v_1}{R_3} - \frac{A_1 v_1 v_2}{R_5} + \frac{v_3}{R_4} + C_3 \frac{dv_3}{dt} = 0$$

Despejando se obtiene

$$\frac{dv_3}{dt} = \frac{1}{C_3} \left(-\frac{v_1}{R_3} - \frac{v_3}{R_4} + \frac{A_1 v_1 v_2}{R_5} \right) \quad (22)$$

Por lo tanto, partiendo de las ecuaciones (20), (21) y (22), el circuito electrónico de la figura 4 es modelado por

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{R_1 C_1} (v_2) \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R_2 C_2} (v_3) \\ \frac{dv_3}{dt} = \frac{1}{R_3 C_3} \left(-\frac{R_3}{R_4} v_3 - v_1 + \frac{A_1 R_3}{R_5} v_1 v_2 \right) \end{cases} \quad (23)$$

El modelo (23) es equivalente al sistema caótico de Malasoma adimensional (19), bajo las condiciones y mapeos del tiempo, estados y parámetros dados por $\tau = \frac{1}{R_1 C_1} t$, $\frac{v_1}{x_1} = \frac{v_2}{x_2} = \frac{v_3}{x_3} = M$, $M = \frac{R_5}{A_1 R_3}$, $R_1 = R_2 = R_3$, $R_6 = R_7$, $C_1 = C_2 = C_3$, $\alpha = \frac{R_3}{R_4}$.

Circuito MACM

El sistema caótico MACM fue propuesto más recientemente²⁰ como un sistema no lineal cuadrático, representado en su forma adimensional como

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = -ax_1 - bx_2 x_3 \\ \frac{dx_2}{d\tau} = -x_1 + cx_2 \\ \frac{dx_3}{d\tau} = d - x_2^2 - x_3 \end{cases} \quad (24)$$

donde x_1 , x_2 y x_3 son las variables de estado, τ es una variable normalizada de tiempo, a , b , c y d son parámetros constantes. El sistema (24) tiene una realización electrónica por medio del circuito de la figura 5, donde R , R_0 , R_1 , R_2 , ..., R_{11} son resistencias, C_1 , C_2 y C_3 son capacitancias, A_1 y A_2 son las ganancias de los multiplicadores; v_1 , v_2 y v_3 son los voltajes de salida de los op-amp U1B, U1D y U2B, respectivamente. V_{CC} y V_{SS} son los voltajes de alimentación de los amplificadores operacionales U1A, U1B, U1C, U1D, U2A y U2B.

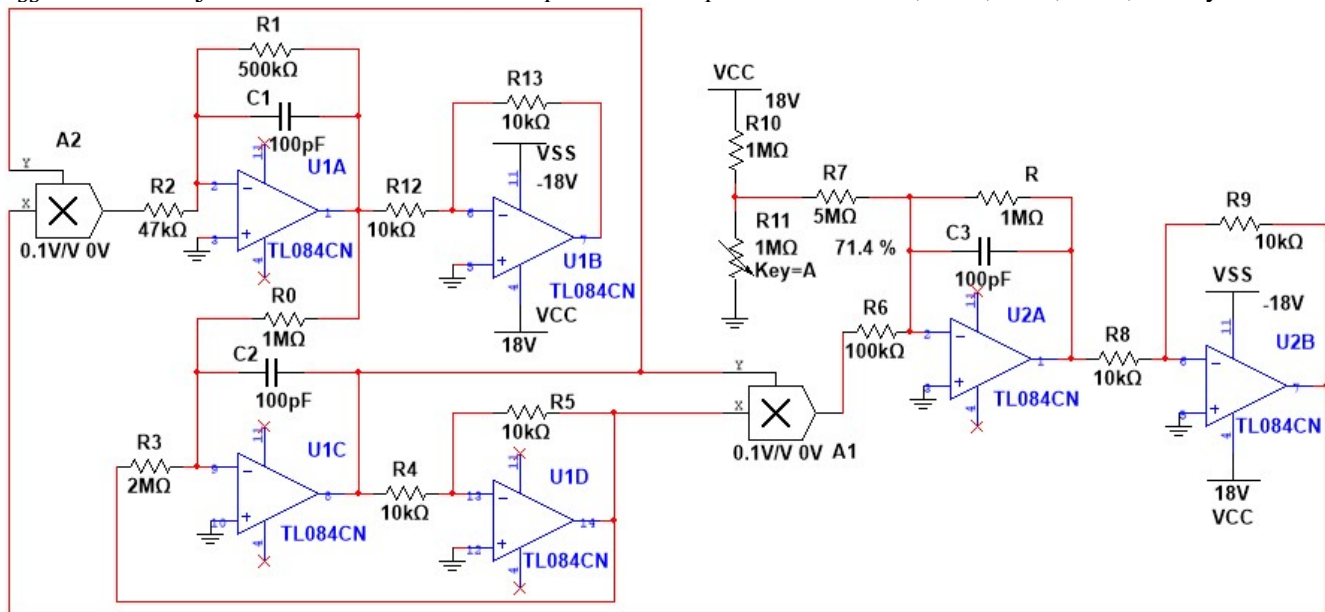


Fig. 5. Diagrama esquemático de realización electrónica para el sistema MACM.

Para demostrar la equivalencia del circuito de la figura 5 con el sistema (24) se realiza el siguiente análisis:

Iniciando con el op-amp U1A, su voltaje de salida es

$$V_{1A} = -\frac{1}{C_1} \int \left(\frac{1}{R_1} V_{1A} + \frac{A_2}{R_2} V_{1C} v_3 \right) dt$$

Si $R_{12} = R_{13}$, el voltaje de salida del op-amp U1B es

$$\begin{aligned} v_1 &= -\frac{R_{13}}{R_{12}} V_{1A} = -V_{1A} \\ v_1 &= \frac{1}{C_1} \int \left(-\frac{1}{R_1} v_1 + \frac{A_2}{R_2} V_{1C} v_3 \right) dt \end{aligned} \quad (25)$$

Para el op-amp U1C, su voltaje de salida es

$$V_{1C} = -\frac{1}{C_2} \int \left(\frac{1}{R_3} v_2 + \frac{1}{R_0} V_{1A} \right) dt = -\frac{1}{C_2} \int \left(\frac{1}{R_3} v_2 - \frac{1}{R_0} v_1 \right) dt$$

Si $R_4 = R_5$, el voltaje de salida del op-amp U1D es

$$\begin{aligned} v_2 &= -\frac{R_5}{R_4} V_{1C} = -V_{1C} \\ v_2 &= \frac{1}{C_2} \int \left(\frac{1}{R_3} v_2 - \frac{1}{R_0} v_1 \right) dt \end{aligned} \quad (26)$$

Para el op-amp U2A, su voltaje de salida es

$$V_{2A} = -\frac{1}{C_3} \int \left(\frac{R_{11}}{R_7(R_{10} + R_{11})} V_{CC} + \frac{A_1}{R_6} V_{1C} v_2 + \frac{1}{R} V_{2A} \right) dt$$

Si $R_8 = R_9$, el voltaje de salida del op-amp U2B es

$$\begin{aligned} v_3 &= -\frac{R_9}{R_8} V_{2A} = -V_{2A} \\ v_3 &= \frac{1}{C_3} \int \left(\frac{R_{11}}{R_7(R_{10} + R_{11})} V_{CC} - \frac{A_1}{R_6} v_2^2 - \frac{1}{R} v_3 \right) dt \end{aligned} \quad (27)$$

Por lo tanto, partiendo de las ecuaciones (25), (26) y (27), si $R_0 = R$, el circuito electrónico de la figura 5 es modelado por

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{RC_1} \left(-\frac{R}{R_1} v_1 - \frac{A_2 R}{R_2} v_2 v_3 \right) \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{RC_2} \left(-v_1 + \frac{R}{R_3} v_2 \right) \\ \frac{dv_3}{dt} = \frac{1}{RC_3} \left(\frac{RR_{11}}{R_7(R_{10} + R_{11})} V_{CC} - \frac{A_1 R}{R_6} v_2^2 - v_3 \right) \end{cases} \quad (28)$$

El modelo (28) es equivalente al sistema caótico de MACM adimensional (24), bajo las condiciones y mapeos del tiempo, estados y parámetros dados por $\tau = \frac{1}{RC_1} t$, $\frac{v_1}{x_1} = \frac{v_2}{x_2} = \frac{v_3}{x_3} = M$, $M = \frac{R_6}{A_1 R}$, $R_0 = R$, $R_4 = R_5$, $R_8 = R_9$, $R_{12} = R_{13}$, $C_1 = C_2 = C_3$, $a = \frac{R}{R_1}$, $b = \frac{A_2 R_6}{A_1 R_2}$, $c = \frac{R}{R_3}$ y $d = \frac{A_1 R^2 R_{11}}{R_6 R_7 (R_{10} + R_{11})} V_{CC}$.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Con el fin de verificar que el comportamiento de las realizaciones electrónicas sea congruente con el comportamiento típico de los sistemas caóticos de Lorenz, Lü, Chen, Rössler, Liu-Chen, Malasoma y MACM, los circuitos analógicos de las figuras 1 a 5 son implementados en el software de circuitos Multisim y su respuesta se compara con la de los modelos adimensionales en simulaciones numéricas en el software Scilab.

Para la instrumentación electrónica del circuito analógico de Lorenz de la figura 1 se utilizaron op-amp LM324 y los circuitos integrados AD633JN como multiplicadores de voltaje cuya ganancia fue de $A_1 = A_2 = 1$ V/V, se consideraron los parámetros $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_7 = R_8 = R_{10} = R_{12} = R_{13} = 100\text{k}\Omega$, $R_5 = 10\text{k}\Omega$, $R_6 = 3.57\text{k}\Omega$, $R_9 = R_{11} = 1.5\text{k}\Omega$, $R_{14} = 37.5\text{k}\Omega$, $C_1 = C_2 = C_3 = 10\text{nF}$, $S_0=1$ y $S_1=1$; que corresponden a los valores $\sigma = 10$, $\rho = 28$ y $b = 8/3$ del modelo adimensional (2), con $M=0.015$ y $\tau = 1,000t$.

Para la instrumentación electrónica del circuito analógico de Lü de la figura 1 se utilizaron op-amp LM324 y los circuitos integrados AD633JN como multiplicadores de voltaje cuya ganancia fue de $A_1 = A_2 = 1$ V/V, se consideraron los parámetros $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_8 = R_{10} = R_{12} = R_{13} = 100\text{k}\Omega$, $R_5 = 2.77\text{k}\Omega$, R_6 no importa, $R_7 = 5\text{k}\Omega$, $R_9 = R_{11} = 1.5\text{k}\Omega$, $R_{14} = 33.3\text{k}\Omega$, $C_1 = C_2 = C_3 = 10\text{nF}$, $S_0=0$ y $S_1=0$; que corresponden a los valores $a = 36$, $b = 3$ y $c = 20$ del modelo adimensional (3), con $M=0.015$ y $\tau = 1,000t$.

Para la instrumentación electrónica del circuito analógico de Chen de la figura 1 se utilizaron op-amp LM324 y los circuitos integrados AD633JN como multiplicadores de voltaje cuya ganancia fue de $A_1 = A_2 = 1$ V/V, se consideraron los parámetros $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_8 = R_{10} = R_{12} = R_{13} = 100\text{k}\Omega$, $R_5 = 2.857\text{k}\Omega$, $R_6 = 14.286\text{k}\Omega$, $R_7 = 3.57\text{k}\Omega$, $R_9 = R_{11} = 1.5\text{k}\Omega$, $R_{14} = 33.3\text{k}\Omega$, $C_1 = C_2 = C_3 = 10\text{nF}$, $S_0=1$ y $S_1=0$; que corresponden a los valores $a = 35$, $b = 3$ y $c = 28$ del modelo adimensional (4), con $M=0.015$ y $\tau = 1,000t$.

Para la instrumentación electrónica del circuito analógico de Rössler de la figura 2 se utilizaron op-amp TL082 y el circuito integrado AD633JN como multiplicador de voltaje cuya ganancia fue de $A_1 = 0.1$ V/V. Se consideraron los parámetros $R_1 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_{10} = R_{11} = R_{12} = 100\text{k}\Omega$, $R_2 = 500\text{k}\Omega$, $R_7 = 7.5\text{M}\Omega$, $R_8 = 100\Omega$, $R_9 = 10\text{k}\Omega$, $R_{13} = 1.754\text{k}\Omega$, $C_1 = C_2 = C_3 = 1\text{nF}$, $V_{CC} = 15\text{V}$, $V_{SS} = -15\text{V}$, que corresponden a los valores $a = 0.2$, $b = 0.2$ y $c = 5.7$ del modelo adimensional (9), con $M=0.1$ y $\tau = 10,000t$.

Para la instrumentación electrónica del circuito analógico de Liu-Chen de la figura 3 se utilizaron op-amp TL082 y TL084, AD633JN como multiplicadores de voltaje cuya ganancia fue de $A_1 = A_2 = A_3 = 10$ V/V, y se consideraron los parámetros $R_1 = R_2 = R_9 = R_{10} = R_{11} = R_{12} = 10\text{k}\Omega$, $R_3 = 80\text{k}\Omega$, $R_4 = R_6 = R_8 = 400\text{k}\Omega$, $R_5 = 40\text{k}\Omega$, $R_7 = 117.64\text{k}\Omega$, $C_1 = C_2 = C_3 = 1\text{nF}$, $V_{SS} = -15\text{V}$, $V_{DD} = 15\text{V}$; que corresponden a los valores $a = 5$, $b = 10$ y $c = 3.4$ del modelo adimensional (14), con $M=0.1$ y $\tau = 2,500t$.

Para la instrumentación electrónica del circuito analógico de Malasoma de la figura 4, se usaron op-amp TL084, el circuito integrado AD633JN como multiplicador de voltaje cuya ganancia fue de $A_1 = 0.1$ V/V y se consideraron los parámetros $R_1 = R_2 = R_3 = R_6 = R_7 = 10\text{k}\Omega$, $R_4 = 4.9\text{k}\Omega$, $R_5 = 560\Omega$, $C_1 = C_2 = C_3 = 100\text{nF}$ y voltajes de alimentación de $V_{CC} = 12\text{V}$ y $V_{SS} = -12\text{V}$, que corresponden al valor $\alpha = \frac{R_1}{R_4} = 2.04$ del modelo adimensional (19), con $M=0.56$ y $\tau = 10,000t$.

Para la instrumentación electrónica del circuito analógico MACM de la figura 5, se usaron op-amp TL084, circuitos integrados AD633JN como multiplicadores de voltaje cuyas ganancias fueron de $A_1 = A_2 = 0.1$ V/V y se consideraron los parámetros $R_0 = R = 1\text{M}\Omega$, $R_1 = 500\text{k}\Omega$, $R_2 = 47\text{k}\Omega$, $R_3 = 2\text{M}\Omega$, $R_4 = R_5 = R_8 = R_9 = R_{12} = R_{13} = 10\text{k}\Omega$, $R_6 = 100\text{k}\Omega$, $R_7 = 5\text{M}\Omega$, $R_{10} = 1\text{M}\Omega$, $R_{11} = 714\text{k}\Omega$, $C_1 = C_2 = C_3 = 100\text{pF}$, voltajes de alimentación de $V_{CC} = 18\text{V}$ y $V_{SS} = -18\text{V}$, que corresponden a los valores $a = 2$, $b = 2.13$, $c = 0.5$ y $d = 1.5$ del modelo adimensional (24), con $M=1$ y $\tau = 10,000t$.

RESULTADOS DE SIMULACIONES Y DE IMPLEMENTACIÓN

A continuación, se muestran y comparan los resultados obtenidos de las implementaciones de los circuitos y simulaciones de los modelos adimensionales. Los datos numéricos obtenidos se muestran gráficamente en forma de proyecciones de los atractores caóticos en los planos de fase.

Sistema de Lorenz

En la figura 6, se muestran los voltajes del circuito analógico de la figura 1 en proyecciones planares de su atractor caótico con Multisim. En la figura 7, se muestra el atractor del modelo (8), obtenido para ese circuito.

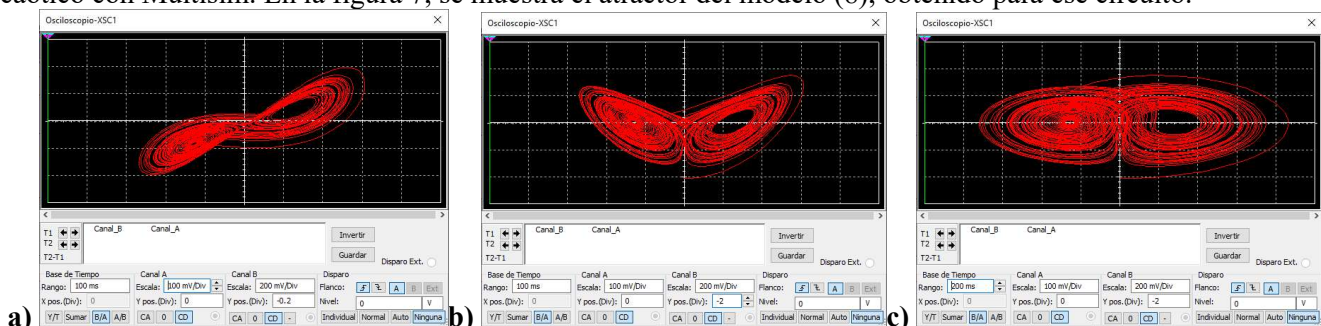


Fig. 6. Atractor de Lorenz del circuito de la figura 1, en planos v_1 - v_2 (a), v_1 - v_3 (b) y v_2 - v_3 (c).

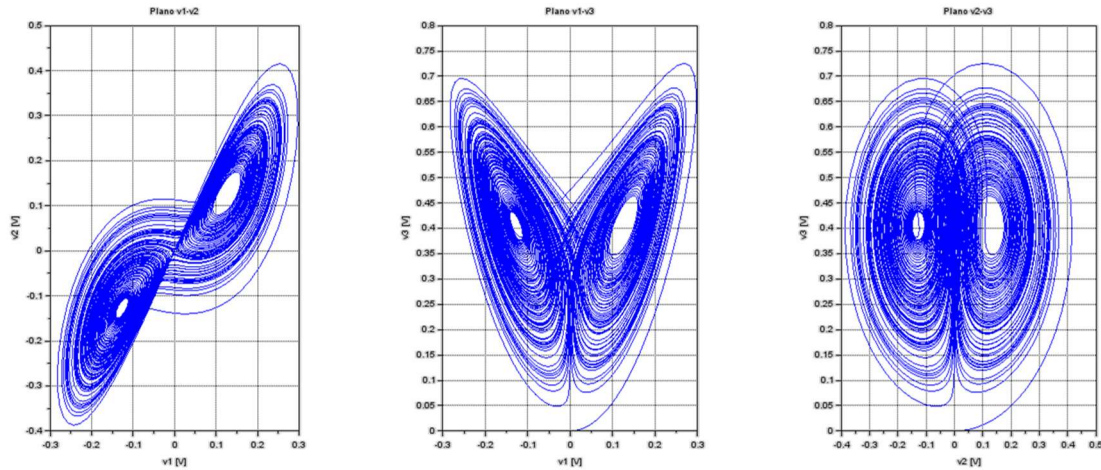


Fig. 7. Atractor de Lorenz del modelo (8) del circuito, en planos v_1 - v_2 , v_1 - v_3 y v_2 - v_3 .

En la figura 8, se muestra el atractor del modelo (8) mapeado a la escala equivalente del sistema adimensional (2). En la figura 9, se muestra el atractor del sistema adimensional (2) mediante el software Scilab.

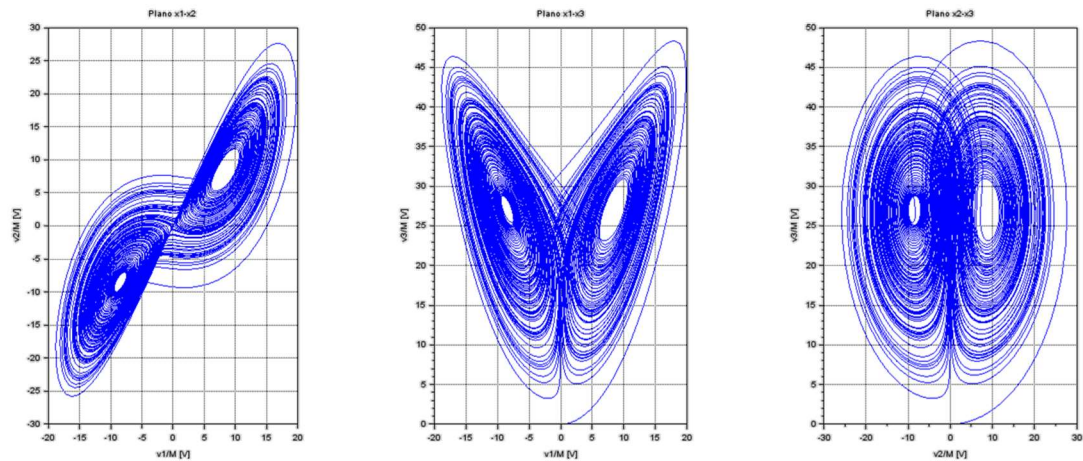


Fig. 8. Atractor de Lorenz del modelo (8) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

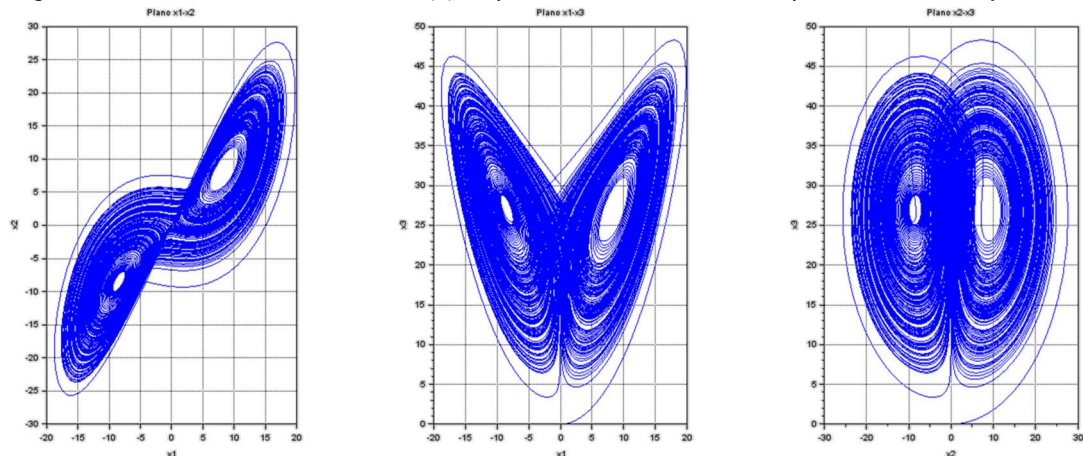


Fig. 9. Atractor de Lorenz del modelo adimensional (2), en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

Sistema de Lü

En la figura 10, se muestran los voltajes del circuito analógico de la figura 1 en proyecciones planares de su atractor caótico con Multisim. En la figura 11, se muestra el atractor del modelo (8), obtenido para ese circuito. En la figura 12, se muestra el atractor del modelo (8) mapeado a la escala equivalente del sistema adimensional (3). En la figura 13, se muestra el atractor del sistema adimensional (3) mediante el software Scilab.

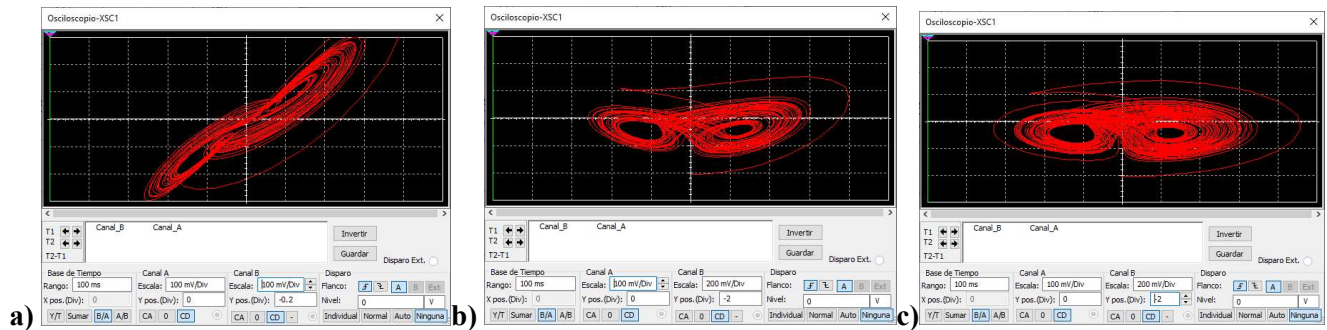


Fig. 10. Atractor de Lü del circuito de la figura 1, en planos v_1-v_2 (a), v_1-v_3 (b) y v_2-v_3 (c).

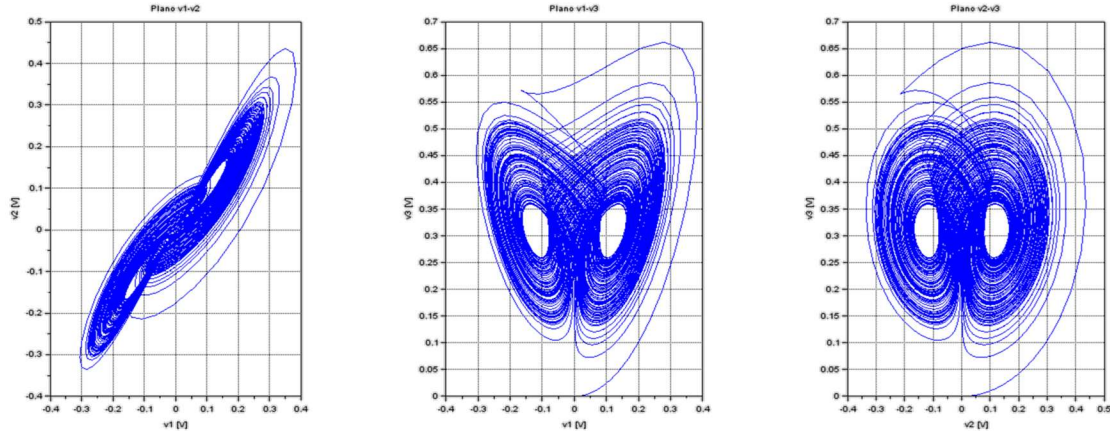


Fig. 11. Atractor de Lü del modelo (8) del circuito, en planos v_1-v_2 , v_1-v_3 y v_2-v_3 .

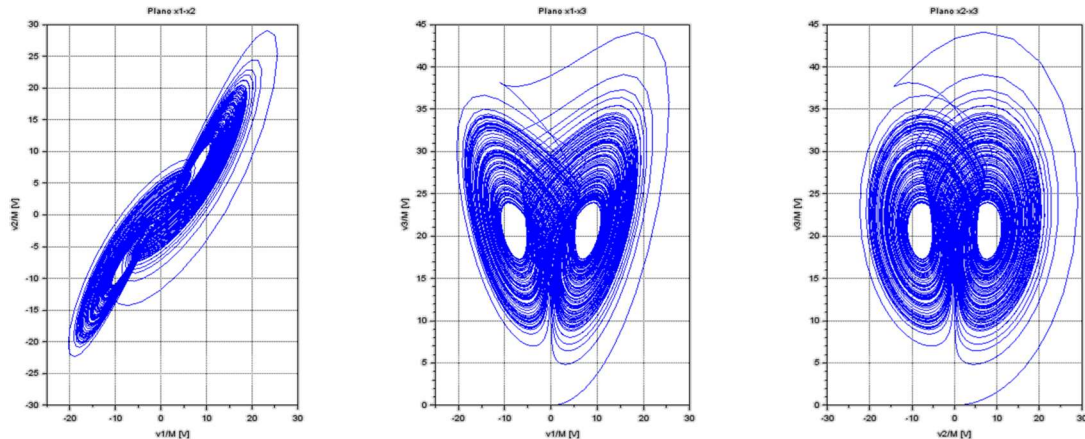


Fig. 12. Atractor de Lü del modelo (8) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

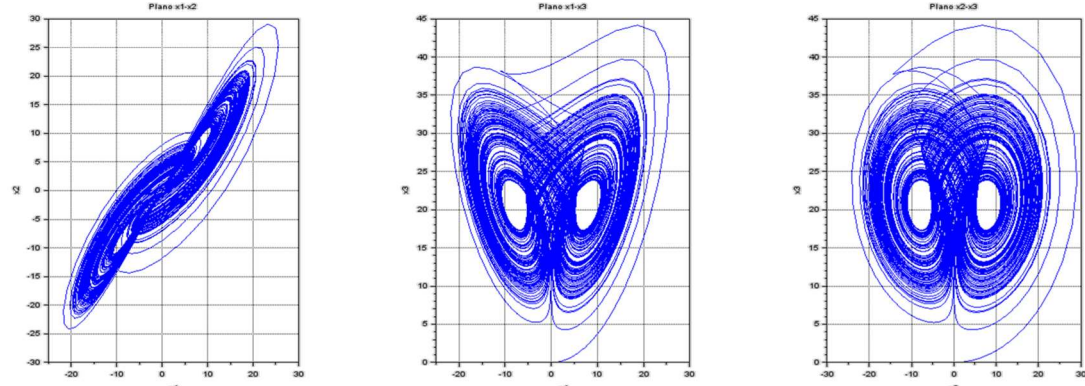


Fig. 13. Atractor de Lü del modelo adimensional (3), en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

En la figura 14, se muestran los voltajes del circuito analógico de la figura 1 en proyecciones planares de su atractor caótico con Multisim. En la figura 15, se muestra el atractor del modelo (8), obtenido para ese circuito. En la figura 16, se muestra el atractor del modelo (8) mapeado a la escala equivalente del sistema adimensional (4). En la figura 17, se muestra el atractor del sistema adimensional (4) mediante el software Scilab.

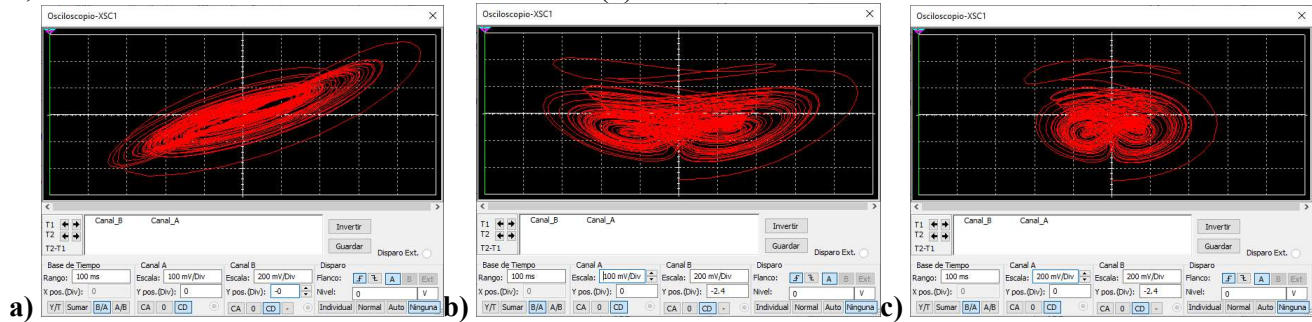


Fig. 14. Atractor de Chen del circuito de la figura 1, en planos v_1-v_2 (a), v_1-v_3 (b) y v_2-v_3 (c).

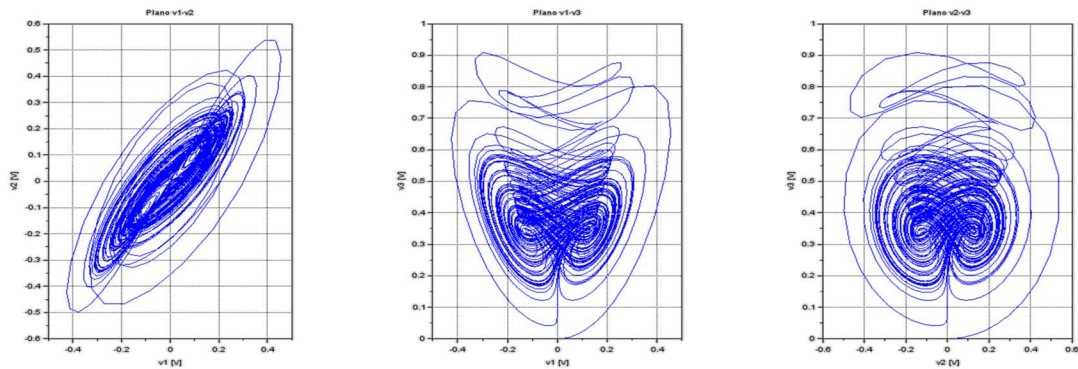


Fig. 15. Atractor de Chen del modelo (8) del circuito, en planos v_1-v_2 , v_1-v_3 y v_2-v_3 .

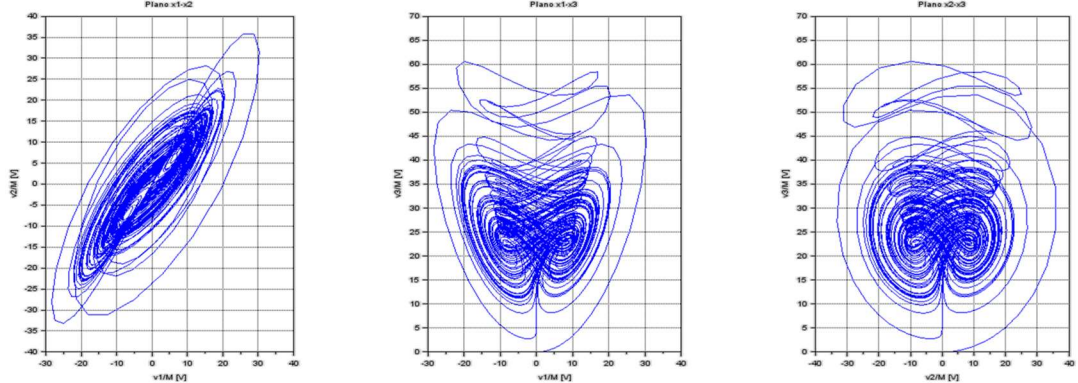


Fig. 16. Atractor de Chen del modelo (8) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

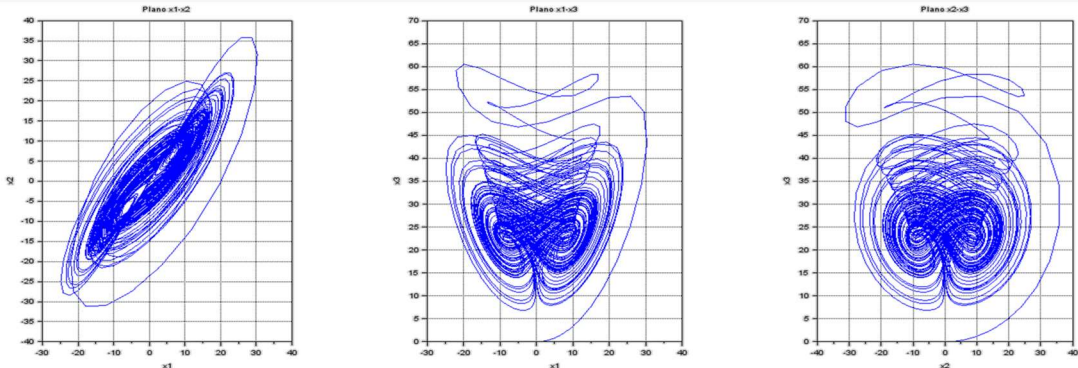


Fig. 17. Atractor de Chen del modelo adimensional (4), en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

Sistema de Rössler

En la figura 18, se muestran los voltajes del circuito analógico de la figura 2 en proyecciones planares de su atractor caótico con Multisim. En la figura 19, se muestra el atractor del modelo (13), obtenido para ese circuito. En la figura 20, se muestra el atractor del modelo (13) mapeado a la escala equivalente del sistema adimensional (9). En la figura 21, se muestra el atractor del sistema adimensional (9) mediante el software Scilab.

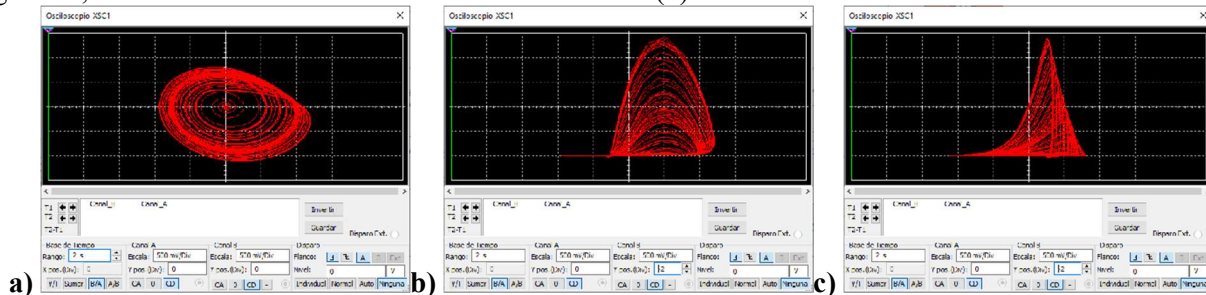


Fig. 18. Atractor de Rössler del circuito de la figura 2, en planos v_1 - v_2 (a), v_1 - v_3 (b) y v_2 - v_3 (c).

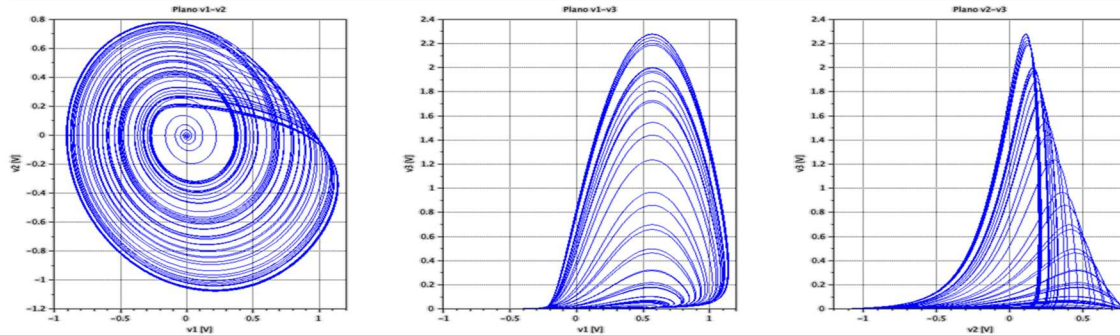


Fig. 19. Atractor de Rössler del modelo (13) del circuito, en planos v_1 - v_2 , v_1 - v_3 y v_2 - v_3 .

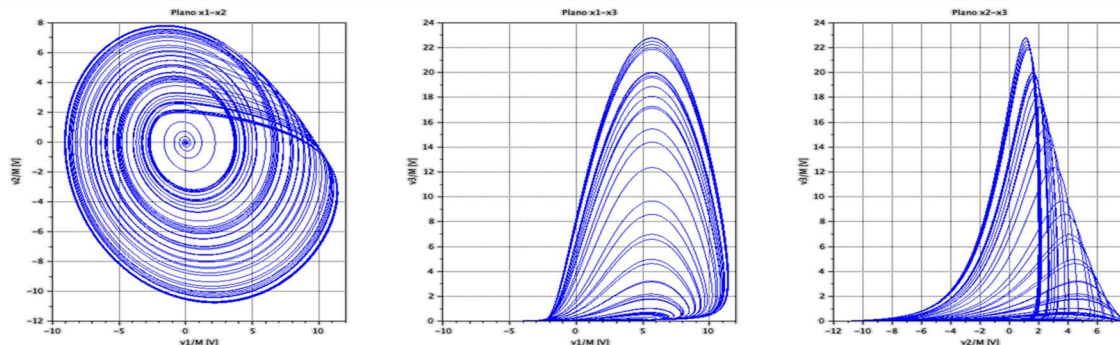


Fig. 20. Atractor de Rössler del modelo (13) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

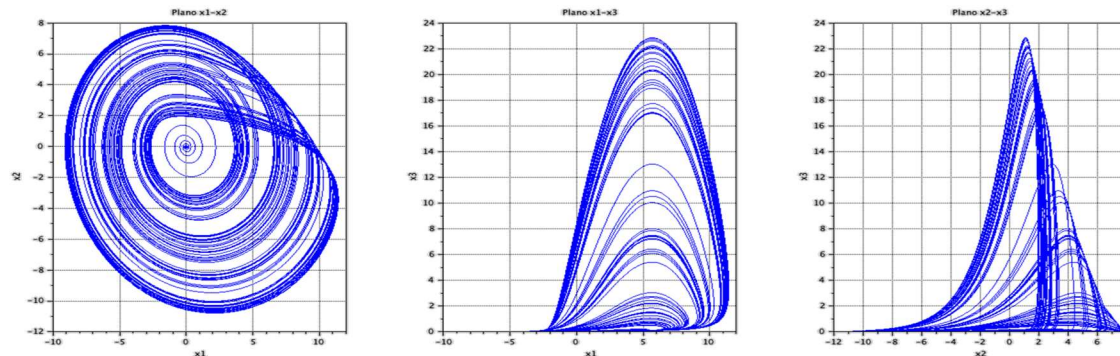


Fig. 21. Atractor de Rössler del modelo adimensional (9), en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

Sistema Liu-Chen

En la figura 22, se muestran los voltajes del circuito analógico de la figura 3 en proyecciones planares de su atractor caótico con Multisim. En la figura 23, se muestra el atractor del modelo (18), obtenido para ese circuito. En la

figura 24, se muestra el atractor del modelo (18) mapeado a la escala equivalente del sistema adimensional (14). En la figura 25, se muestra el atractor del sistema adimensional (14) mediante el software Scilab.

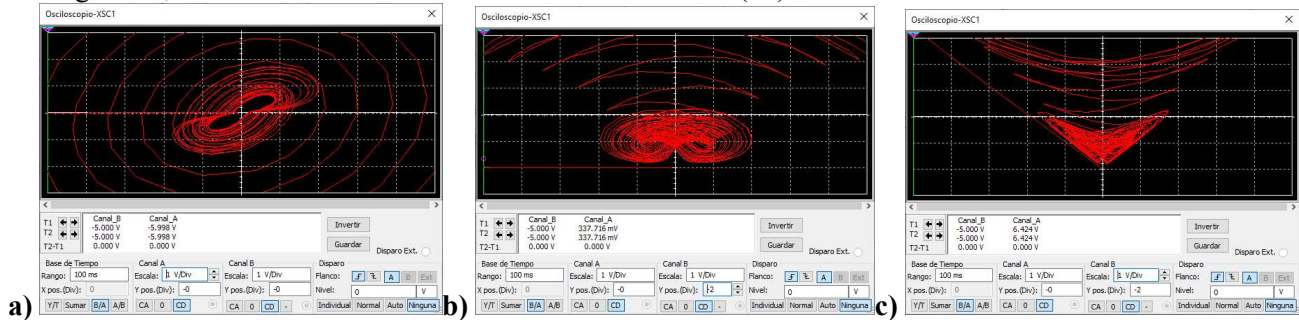


Fig. 22. Atractor de Liu-Chen del circuito de la figura 3, en planos v_1 - v_2 (a), v_1 - v_3 (b) y v_2 - v_3 (c).

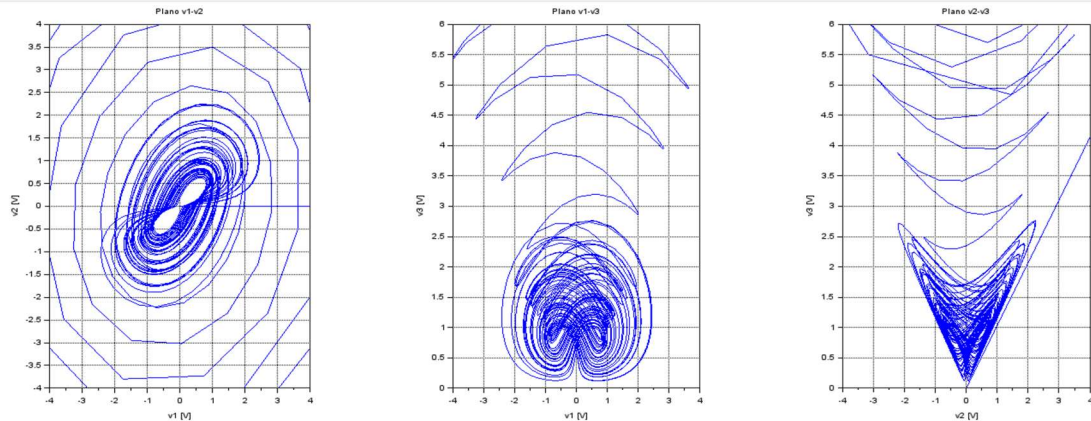


Fig. 23. Atractor de Liu-Chen del modelo (18) del circuito, en planos v_1 - v_2 , v_1 - v_3 y v_2 - v_3 .

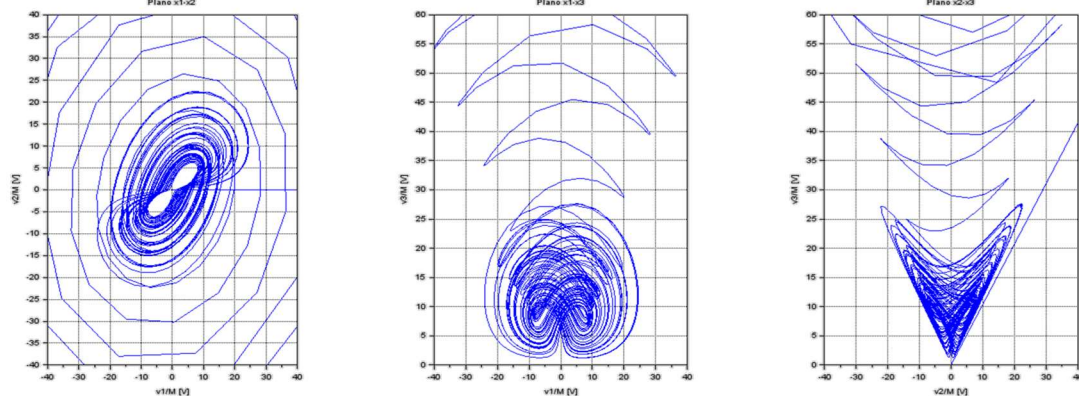


Fig. 24. Atractor de Liu-Chen del modelo (18) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

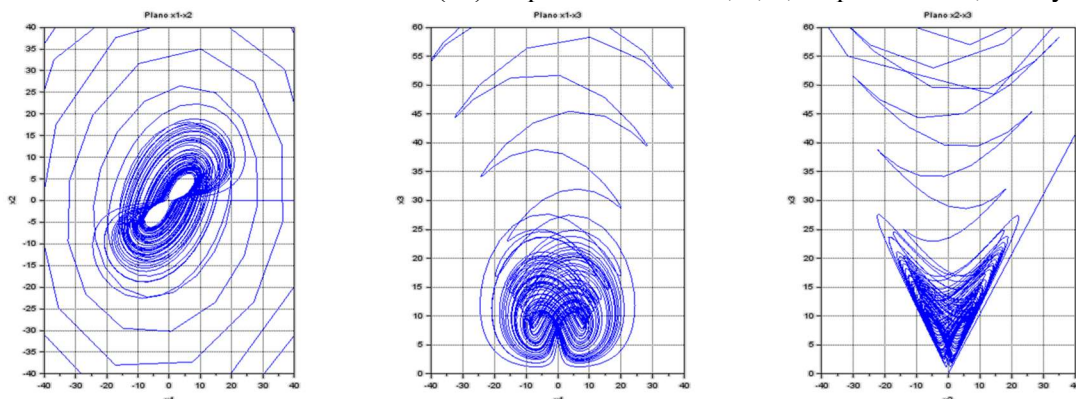


Fig. 25. Atractor de Liu-Chen del modelo adimensional (14), en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

Sistema Malasoma

En la figura 26, se muestran los voltajes del circuito analógico de la figura 4 en proyecciones planares de su atractor caótico con Multisim. En la figura 27, se muestra el atractor del modelo (23), obtenido para ese circuito. En la figura 28, se muestra el atractor del modelo (23) mapeado a la escala equivalente del sistema adimensional (19). En la figura 29, se muestra el atractor del sistema adimensional (19) mediante el software Scilab.

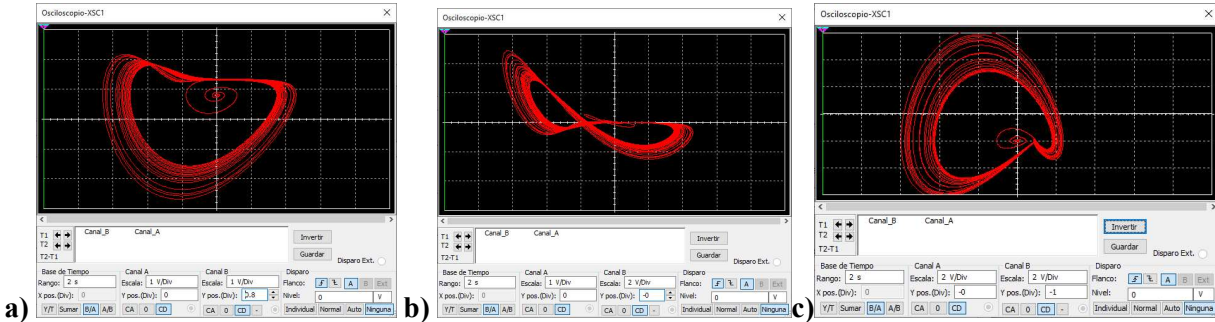


Fig. 26. Atractor de Malasoma del circuito de la figura 4, en planos v_1 - v_2 (a), v_1 - v_3 (b) y v_2 - v_3 (c).

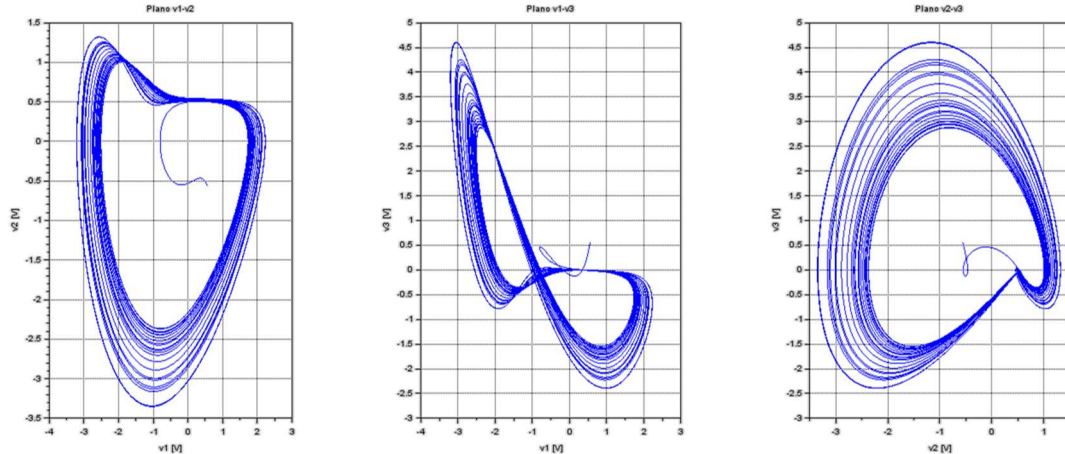


Fig. 27. Atractor de Malasoma del modelo (23) del circuito, en planos v_1 - v_2 , v_1 - v_3 y v_2 - v_3 .

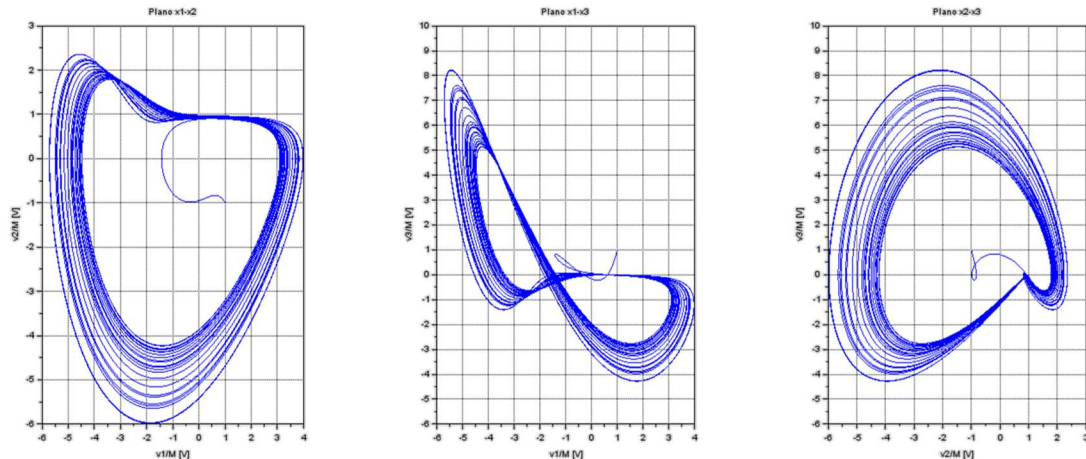


Fig. 28. Atractor de Malasoma del modelo (23) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

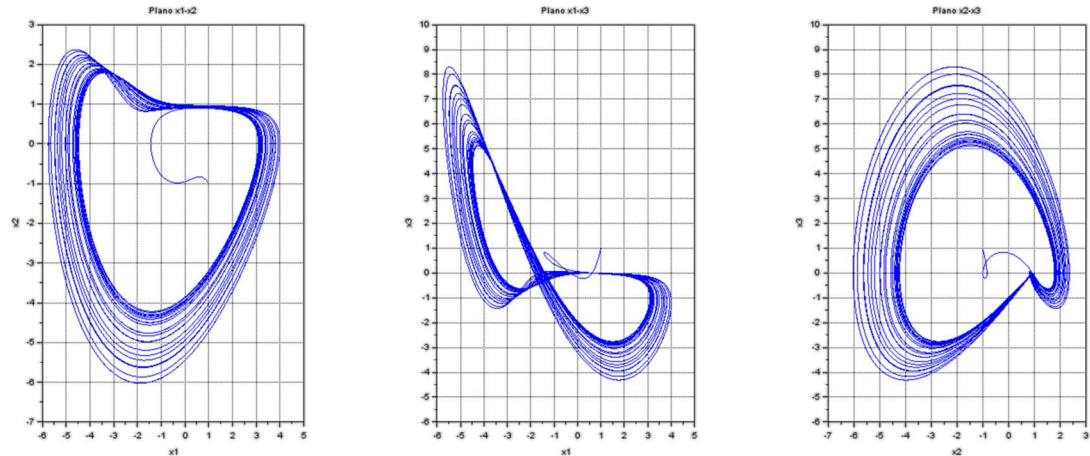


Fig. 29. Atractor de Malasoma del modelo adimensional (19), en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

Sistema MACM

En la figura 30, se muestran los voltajes del circuito analógico de la figura 5 en proyecciones planares de su atractor caótico con Multisim. En la figura 31, se muestra el atractor del modelo (28), obtenido para ese circuito. En la figura 32, se muestra el atractor del modelo (28) mapeado a la escala equivalente del sistema adimensional (24). En la figura 33, se muestra el atractor del sistema adimensional (24) mediante el software Scilab.

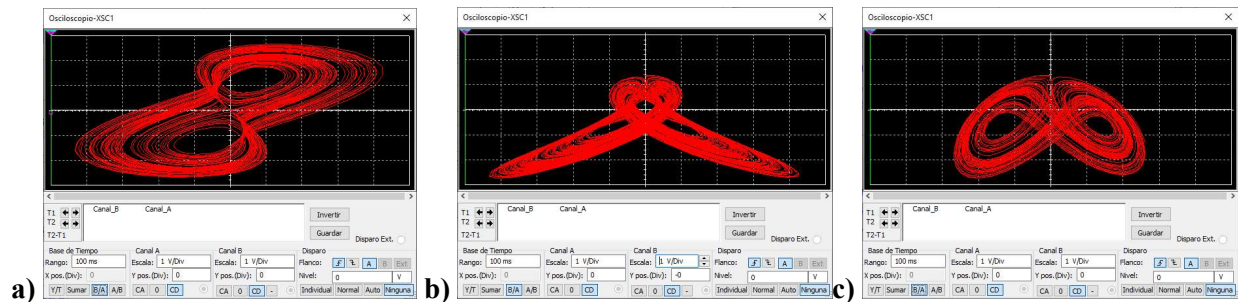


Fig. 30. Atractor de MACM del circuito de la figura 5, en planos v_1 - v_2 (a), v_1 - v_3 (b) y v_2 - v_3 (c).

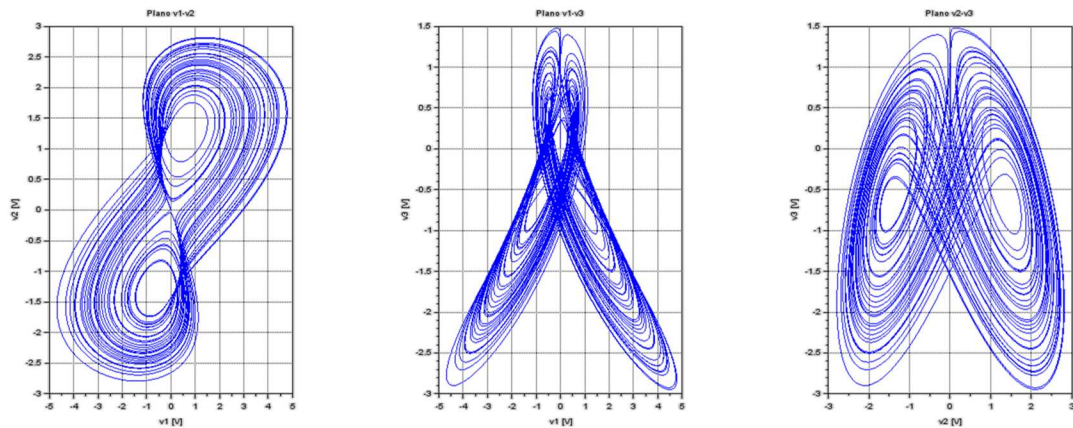


Fig. 31. Atractor de MACM del modelo (28) del circuito, en planos v_1 - v_2 , v_1 - v_3 y v_2 - v_3 .

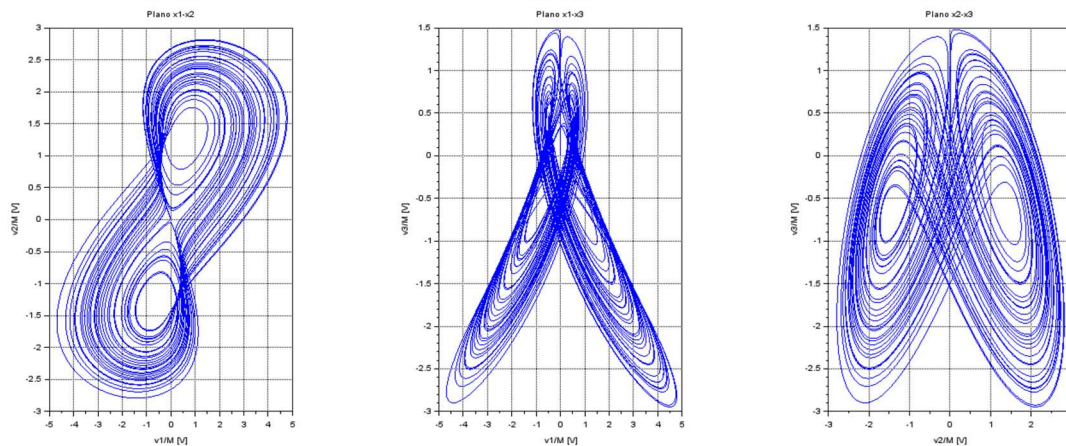


Fig. 32. Atractor de MACM del modelo (28) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

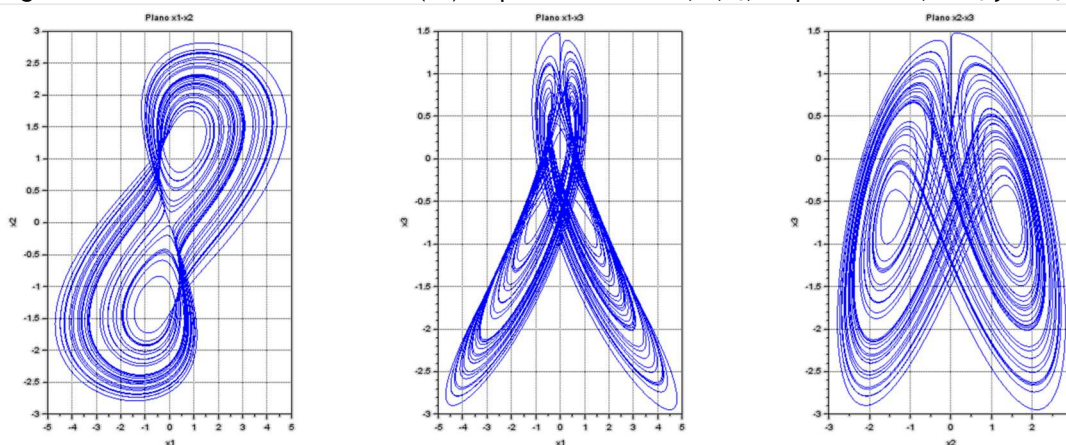


Fig. 33. Atractor de MACM del modelo adimensional (24), en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

Discusión de resultados

Como puede verse en las figuras 6, 10, 14, 18, 22, 26 y 30, los voltajes mostrados en osciloscopio del software Multisim reproducen los atractores caóticos respectivos, en rangos de operación admisibles. Con las figuras 7, 11, 15, 19, 23, 27 y 31, se valida la respuesta de los modelos obtenidos para los circuitos electrónicos respectivos (véase la forma y amplitud de cada atractor). En las figuras 8, 12, 16, 20, 24, 28 y 32, se puede apreciar que los atractores escalados de los modelos matemáticos obtenidos para cada circuito electrónico, mediante los mapeos calculados, presentan características de forma y amplitud congruentes con los atractores caóticos típicos de los modelos matemáticos adimensionales de las figuras 9, 13, 17, 21, 25, 29 y 33. Por lo que se puede concluir que son válidas tanto las realizaciones electrónicas presentadas, los modelos matemáticos obtenidos (8), (13), (18), (23) y (28), así como los mapeos y equivalencias de parámetros y variables calculados para cada sistema caótico.

CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra la realización y modelado de varios de los sistemas caóticos más conocidos con términos cuadráticos, utilizando multiplicadores y op-amp. Un circuito propuesto en este trabajo permite unificar la realización de los sistemas de Lorenz, Chen y Lü, con sólo ajustar algunos de sus componentes variables. El modelado y análisis realizados permite seleccionar con mayor libertad los componentes electrónicos de los circuitos para que su comportamiento sea consistente con el de los modelos matemáticos caóticos adimensionales establecidos en la literatura. Particularmente, con los modelos y equivalencias obtenidos fue posible ajustar los valores de componentes para acotar los atractores caóticos a rangos de operación admisibles en circuitos electrónicos. En las siguientes partes de este trabajo, se mostrará la realización electrónica de sistemas lineales por tramos y la implementación en dispositivos digitales.

REFERENCIAS

1. Lorenz, E.N. Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, (1963) 20: 130-141.
2. Kevin M. Cuomo and Alan V. Oppenheim. Circuit implementation of Synchronized Chaos with Applications to Communications. *Physical Review Letters*. (1993) 71(65).
3. Olivares, D. Aplicación de sistemas caóticos en control automático. Tesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, NL, México. (1994).
4. Pecora, L. M., Carroll, T. L., Johnson, G. A., Mar, D. J., and Heagy, J. F. Fundamentals of synchronization in chaotic systems, concepts, and applications. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. (1997) 7(4): 520-543.
5. Jaimes-Reátegui, R. et. al. Secure optoelectronic communication using laser diode by chaotic Rössler circuits. *Journal of Physics: Conference Series*. (2001) 274: 012024.
6. García-Lopez, J. H. et. al. Novel communication scheme based on chaotic Rössler circuits. *Journal of Physics: Conference Series*. (2005) 23: 029
7. García-López, J. H. et. al. Synchronization of chaotic systems with coexisting attractors. *Physical Review Letters*. (2006) 96(24): 244102.
8. Rodríguez-Liñan, A., de León Morales, J. Sincronización de caos mediante observadores para cifrado en comunicaciones. *Ingenierías*. (2007) 10(34): 44-50.
9. Rössler, O. E. An equation for continuous chaos. *Physics Letters A*. (1976) 57(5): 397-398.
10. Braun, T. and Heisler, I. A. A comparative investigation of controlling chaos in a Rössler system. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. (2000) 283: 136-19.
11. L. Pecora, T. Carroll, & J. Heagy. *Synchronization in Chaotic Systems, Concepts and Applications*. (2006).
12. Chiu, R., Mora-González, M., and Lopez-Mancilla, D. Osciladores Caóticos implementados en Microcontrolador PIC18F. *Nova scientia*. (2013) 6(12): 60-77.
13. P. Salas C. Análisis y diseño de sistemas caóticos clásicos con base en filtros pasa-bajas. Tesis, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México (2018).
14. Wang, M.J. Chaotic Control of Lü System via Three Methods. *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*, (2014) 3: 29-36.
15. Malasoma, J.M. A new class of minimal chaotic flows. *Physics Letters A*, 2002; 305: 52-58.
16. Hambley, A.R., *Electronics*, (2000) Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall.
17. Lü, J. and Chen, G. A New Chaotic Attractor Coined. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, (2002) 12, 659-661.
18. Chen, G. and Ueta, T. Yet Another Chaotic Attractor. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, (1999) 9, 1465-1466.
19. Pehlivan İ, Kurt E, Lai Q, Basaran A, Kutlu M. A Multiscroll Chaotic Attractor and its Electronic Circuit Implementation, *Chaos Theory and Applications*. 2019; 1(1): 29-37.
20. Méndez-Ramírez, R., Cruz-Hernández, C., Arellano-Delgado, A. and Martínez-Clark, R. A new simple chaotic Lorenz-type system and its digital realization using a TFT touch-screen display embedded system. *Complexity*, 2017(6820492): 1-13.

Un viaje por el tiempo

José Rubén Morones Ibarra

Universidad Autónoma de Nuevo León,

Facultad de Físico-Matemáticas

rubenmorones@yahoo.com.mx

RESUMEN

En este artículo se analiza la evolución que ha tenido el concepto tiempo en la ciencia. El tiempo como un concepto elemental que se forma en nuestra mente simplemente como resultado de nuestra existencia, y que nos permite ordenar los acontecimientos, ha resultado ser uno de los más misteriosos y difíciles de comprender. El tiempo lo introdujo Newton en la ciencia como un parámetro absoluto que no resulta afectado por nada, usándolo como un recurso matemático para describir los fenómenos de la naturaleza. Posteriormente, Einstein encontraría que el tiempo no es una cantidad absoluta, sino que depende del observador que lo mida. Actualmente se piensa que el tiempo, que parece que fluye como un continuo, puede ser discreto. Además, es posible que el pasado, que creemos que es algo que dejó de existir, puede ser revisitado con la posibilidad de los viajes en el tiempo.

PALABRAS CLAVE

El concepto tiempo, el tiempo en la ciencia, el tiempo en la relatividad, cuantización del tiempo, viajes en el tiempo.

ABSTRACT

In this article the evolution of the concept of time in science is analyzed. Time as an elementary concept that is formed in our mind simply as a result of our existence, and that allows us to order events, has turned out to be one of the most mysterious and difficult to understand. Time was introduced by Newton in science as an absolute parameter that is not affected by anything, using it as a mathematical resource to describe the phenomena of nature. Later, Einstein would find that time is not an absolute quantity, but depends on the observer that measures it. Time, which seems to flow as a continuum, could be discrete. Furthermore, it is possible that the past, which we believe to be something that ceased to exist, can be revisited with the possibility of time travel.

KEYWORDS

Concept of time, time in science, time in relativity, time quantization, timetravels.

INTRODUCCIÓN

Los tres conceptos fundamentales y más primitivos que aparecen en nuestra mente en forma natural, como resultado solamente de nuestra existencia y capacidad de observación, son los de espacio, tiempo y materia. Podríamos agregar, muchos más, como el de movimiento, por

ejemplo, pero este concepto queda relacionado finalmente con lo que se mueve, que es materia, y con el espacio y el tiempo. Así que el movimiento puede ser descrito en términos de los conceptos más fundamentales ya mencionados. Podemos concluir que espacio, tiempo y materia son más básicos que el concepto de movimiento. Movimiento es algo que le ocurre a la materia, o es una forma en la que se presenta la materia.

En este artículo se abordarán algunas ideas asociadas con el concepto tiempo. Encontraremos que este concepto no es tan simple como puede parecer desde el punto de vista de nuestra intuición. Por otra parte, algunos temas tratados aquí, como el de la construcción de una teoría física donde no aparezca el tiempo o el asunto de los viajes en el tiempo, no son tópicos que pertenezcan a la ciencia de ficción o a ideas fantásticas, por el contrario todo ello está enmarcado estrictamente dentro de la ciencia moderna y es actualmente objeto de estudio.

El famoso cosmólogo Stephen Hawking solía mencionar que se pueden establecer tres conceptos asociados con el tiempo. El primero de ellos es el de "tiempo psicológico". Este concepto corresponde a nuestra percepción del tiempo como seres humanos. En él distinguimos el pasado, el presente y el futuro. El pasado lo identificamos mediante el recuerdo. Recordamos el pasado, pero no cosas del futuro. El presente es lo que estamos viviendo, y el futuro es algo desconocido. Además, sabemos que nos movemos hacia adelante en el tiempo, es decir, hacia el futuro, porque el número de cosas que podemos recordar está aumentando.

Una segunda idea del tiempo es el del "tiempo entrópico", el cual está asociado con el concepto termodinámico de entropía. Las ideas detrás del concepto de tiempo entrópico están relacionadas con la observación de que los fenómenos naturales ocurren de tal manera que el desorden total del universo aumenta siempre. Como ejemplo citamos el hecho de que si ponemos una gota de tinta en un vaso con agua, la tinta empieza a difundirse en el agua. Ese es el proceso natural. Esto define la flecha del tiempo, como evolucionando del orden hacia el desorden. No esperamos que ocurra lo contrario, que una vez que la tinta se ha diluido en el agua, ocurra el proceso inverso de que todas las pequeñas piezas de tinta diluidas en el agua inicien un proceso inverso de aglomeración y que formen una gota como la que se colocó inicialmente.

El tercer concepto de tiempo es el concepto de "Tiempo cosmológico". Este está asociado con la evolución del universo desde la Gran Explosión hacia el crecimiento o inflación del universo. El tiempo cosmológico t , corresponde a la edad del universo. Se establece que el tiempo inició con la Gran Explosión. Cuando empiece el periodo de contracción del universo, si es que esto ocurrirá, se invertirá la flecha o dirección del tiempo.

El gran problema con el tiempo cosmológico es que no se puede establecer el inicio del tiempo desde un formalismo científico, asociándole un fenómeno físico, que fue el momento del Gran Estallido, ya que esto corresponde a una singularidad cosmológica en la Teoría General de la Relatividad (TGR). La TGR ha sido utilizada en la cosmología para describir la evolución del Universo como un todo, sin embargo esto no está exento de singularidades. Para evitar singularidades de esta naturaleza, Hawking propuso un tratamiento de tiempo imaginario para analizar el origen y evolución del universo. No ha quedado resuelto aún este problema.

LA NATURALEZA DEL TIEMPO

El concepto tiempo es sin duda uno de los más abstractos, complejos y misteriosos en la vida del ser humano. La pregunta ¿qué es el tiempo?, tiene una profunda dificultad para ser

contestada. Cualquier respuesta que demos a ella es susceptible de ser cuestionada y puesta en duda. Sin embargo, existe el tiempo de nuestra experiencia, el tiempo empírico que da forma al concepto de tiempo intuitivo. Después de la teoría de la relatividad el tiempo absoluto en el que creíamos se derrumbó para dar paso a la relatividad del tiempo. Después vendría la teoría cuántica que dio origen a nuevas ideas sobre el tiempo.

Mostraremos, con algunos ejemplos sencillos que lo que consideramos intuitivamente como tiempo es bastante engañoso, y que los conceptos intuitivos que tenemos del tiempo son en realidad equivocados. La percepción humana del tiempo entra en conflicto con el concepto relativista del tiempo. Sin embargo no es necesario adentrarnos en el estudio de la teoría de la relatividad para encontrar algunas dificultades entre nuestra idea de tiempo y lo que la ciencia nos enseña. Con solo admitir el valor finito y constante de la velocidad de la luz, podemos ir entendiendo y aceptando esa diferencia entre el sentido común y el razonamiento científico cuando tratamos al tiempo.

Mientras no nos hagamos la pregunta de ¿qué es el tiempo?, todo parece muy claro sobre el tiempo. Pero en el momento en que tratemos de responder a la pregunta nos encontramos con serias dificultades. Esto se deba a que el tiempo intuitivo debe cumplir con ciertas propiedades, y esto lo convierte en un concepto no simple.

Ilustremos las dificultades que se presentan detrás de las ideas y expresiones sobre el tiempo. El tiempo lo asociamos con eventos que se suceden uno después de otro. El presente es por supuesto diferente del pasado y también lo será del futuro. Sin embargo lo que observamos actualmente pertenece en realidad al pasado. Al ver a una persona que se encuentra a 5 metros de distancia, por ejemplo, lo estamos viendo, al captar su imagen que nos trae la luz, como era hace algunos nanosegundos. Al ver a la Luna lo que captamos es su posición y estado hace un segundo, no en el presente. Al observar una estrella lo que vemos es cómo era hace varios años o millones de años, dependiendo de la distancia a la que se encuentre.

El concepto de "en este momento" o "ahora" es un concepto local, que depende de la capacidad de nuestros relojes para establecer diferencias entre intervalos de tiempo. En el Sol, lo que ocurre en este momento, lo podemos saber solo 8 minutos después, no en este instante. Así que el "ahora" no tiene en general significado físico, solo lo tiene localmente.

EL TIEMPO EN LA CIENCIA

El concepto tiempo en la ciencia ha sufrido modificaciones durante la evolución del conocimiento científico. En la teoría Newtoniana de la mecánica el tiempo fluye sin ninguna relación con nada, con ningún fenómeno. En las teorías físicas anteriores a Einstein el tiempo es un parámetro invariante sin conexión con nada. El tiempo lo incluyó Newton en su teoría de la mecánica como un recurso matemático para la descripción de los fenómenos naturales.

Con la teoría de la relatividad de Einstein, el tiempo se convierte en un actor en la escena de los procesos físicos, no como parte del escenario. El tiempo, el espacio y la materia están estrechamente conectados, no existe el uno sin el otro. El tiempo se deforma, tiene arrugas, es algo elástico. La estructura del espacio-tiempo resulta ser un campo dinámico, como el campo electromagnético o el campo de otras fuerzas de la naturaleza.

LA CUANTIZACIÓN DEL TIEMPO

En las teorías cuánticas, muchas cantidades físicas están cuantizadas. Esto significa que no tienen valores continuos sino discretos. La energía, por ejemplo, aparece en paquetes llamados cuantos de energía, lo mismo que la luz, aparece en cuantos llamados fotones. Cuantizar es equivalente a granular y tener solo granos de cada cantidad.

En la teoría general de la relatividad, la gravitación es una manifestación de la curvatura del espacio-tiempo. En las ondas gravitacionales que se descubrieron en el año 2017, el espacio-tiempo es un campo que se deforma y oscila propagando estas oscilaciones en forma de ondas, llamadas ondas gravitacionales. Esto tiene una gran semejanza con la luz que es el campo electromagnético que se propaga en forma de ondas.

En la teoría cuántica la luz se propaga en paquetes llamados fotones, los cuales tienen existencia real. En una teoría cuántica de la gravedad, la cual aún no se ha logrado desarrollar, tanto el espacio como el tiempo aparecerían en forma de corpúsculos.

La cuantización del campo gravitacional corresponde a la “granulación” del espacio-tiempo. Con esto tendríamos que el espacio y el tiempo no son continuos sino que existen en paquetes de dimensiones que tienen un valor mínimo.

En este caso tendríamos elemento de volumen y de tiempo que ya no podremos dividir más. El espacio y el tiempo se vuelven discretos. Podríamos decir que existen partículas de espacio. Lo mismo podemos decir del tiempo, que serían partículas de tiempo. En la RG cuantizada lo que tendríamos serían partículas de espacio-tiempo. A la mínima longitud espacial que se puede tener se le llama longitud de Planck y tiene un valor de 10^{-33} centímetros. Para el caso del tiempo el valor mínimo es de 10^{-43} segundos, que es llamado el Tiempo de Planck.¹

EL PRINCIPIO DEL TIEMPO

En el estudio del origen del universo se requiere, por supuesto, realizar observaciones. Actualmente existen tres maneras de estudiar el pasado del universo. La primera y más antigua es mediante las ondas electromagnéticas que nos llegan del espacio. En el caso del estudio del pasado más remoto del universo, esto se realiza observando el cielo y buscando los confines del universo, es decir lo más alejado que podamos observar. Al detectar la luz o la información que nos llega de esos lugares lejanos estamos viendo cómo era el universo hace miles de millones de años. Para ver ese estado del universo en el pasado debemos dirigir los más potentes telescopios para observar las galaxias más alejadas. La luz que de ellas proviene nos da información de cómo era la fuente que emitió esta luz hace miles o millones de años.

Como fenómeno comparativo, consideramos la luz que emite nuestro Sol. Al observarla lo que vemos es como era el sol hace 8 minutos, ya que esto es lo que tarda la luz del Sol en llegar a la Tierra. Similarmente, al observar la luz de una estrella que se encuentra a 13 mil millones de años, estamos viendo como era el universo hace 13 mil millones de años.

Sin embargo, no hay manera de ver como era el universo unos minutos después del big bang debido a que no hay luz que nos lo indique. La luz más antigua en el universo es la Radiación de

Fondo. Esta corresponde a una radiación de micro-ondas, que empezó a viajar por el espacio en el momento en que el universo se volvió transparente. Esto ocurrió cuando el universo tenía una edad aproximada de 380 mil años, es decir 380 mil años después del big bang.

Mediante la observación de la luz que nos llega del espacio, no hay manera de “ver” más atrás en el pasado de nuestro universo que cuando este tenía 380 mil años de edad. Ni aun con los telescopios más potentes, puesto que no hay en el universo radiación que corresponda a una edad menor de 380 mil años. La radiación más antigua en el universo es la llamada Cosmic Background Radiation. Ya se ha detectado y nos da información de cómo era el universo a los 380 mil años del big bang.

Existe otra manera de observar el universo a una edad más temprana. Esta forma es observando un tipo de Radiación Cósmica de Fondo de Neutrinos (Cosmic Neutrino Background). Los neutrinos son partículas que interaccionan muy débilmente con la materia, y el universo se volvió transparente a los neutrinos a la edad de un segundo. Por este motivo si se llega a detectar esta radiación de fondo de neutrinos, nos traería información de cómo era el universo después de un segundo del big-bang.

Recientemente, en el año de 2017 se detectaron las ondas gravitacionales, cuya existencia teórica fue predicha por Einstein en su teoría de la Relatividad General. Este nuevo descubrimiento abre una nueva manera de observar el universo. Observar las ondas gravitacionales que se producen en los violentos fenómenos de interacción o colisión de estrellas de neutrones, quásares o agujeros negros nos dará una nueva información de lo que ocurre en el universo. La posibilidad de detectar las ondas gravitacionales primigenias, es decir, aquellas que se originaron en los primeros instantes del big-bang, que sería el origen del tiempo, nos podrá revelar lo que ocurrió durante los primeros instantes del universo, es decir, durante el big bang. Sin embargo, no podemos saber lo que pasó en el tiempo $t = 0$, que sería el verdadero origen del tiempo. Esto representa una singularidad de la teoría general de la relatividad. Por ahora, el tiempo más corto que podemos aproximarnos al origen del universo es 10^{-43} segundos, que es llamado el Tiempo de Planck. Para tiempos menores que el tiempo de Planck la física que tenemos falla y deja de tener validez.

Si nos vamos hacia atrás en el tiempo hasta un instante de tiempo increíblemente pequeño después del big bang, encontramos que todo el universo ocupaba una región infinitesimal del espacio. De acuerdo con las teorías cuánticas este estado presentaría una enorme turbulencia donde se crean y se destruyen, por efectos de fluctuaciones cuánticas, enormes cantidades de materia y energía. Una violenta efervescencia de creación y destrucción de materia ocurría en esos momentos. Con esto concluimos que el comportamiento del universo en sus inicios necesariamente fue cuántico, debido a las dimensiones tan pequeñas del mismo. Por lo tanto, inicialmente el tiempo estaba cuantizado.²

EL TIEMPO EN LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL

El tiempo en la ciencia se mide con instrumentos, con relojes o cronómetros y el hecho es que los intervalos de tiempo que miden estos instrumentos depende del marco de referencia donde se encuentren.

En la teoría de la relatividad lo primero que necesitamos definir para medir el tiempo es un marco de referencia físico. Este marco de referencia consiste en un sistema de coordenadas y un conjunto infinito de relojes colocados en cada punto del espacio. Por definición, un suceso o evento es algo que ocurre en un punto del espacio, en un instante determinado. Un evento queda determinado por un punto (x, y, z, t) en un espacio de cuatro dimensiones, el espacio-tiempo.

Supondremos que un reloj es un mecanismo perfecto que mide el tiempo correctamente. Esto significa que la medición del intervalo de tiempo entre dos sucesos, observados en el mismo marco de referencia, medido por dos relojes diferentes, con posiciones fijas, tiene el mismo valor para todos ellos.

De acuerdo con la teoría de la relatividad especial, al comparar los intervalos de tiempo medidos por relojes diferentes en movimiento relativo uno respecto a otro, obtendremos diferencias que dependen de la velocidad relativa entre ellos. Esencialmente, dos observadores colocados en diferentes marcos de referencia en movimiento relativo, medirán intervalos distintos de tiempo para dos sucesos.

Por otra parte, si incluimos el efecto de la gravedad, es decir, si extendemos las ideas a la Teoría General de la Relatividad (TGR), encontraremos, por ejemplo, que en la superficie de la Tierra, dos relojes colocados a diferente altura miden diferentes intervalos de tiempo, o marchan a diferentes ritmos.

En general, el intervalo de tiempo medido por dos relojes distintos depende del valor de la intensidad del campo gravitacional en el lugar donde está colocado cada reloj. Para ilustrar la idea, realicemos un experimento que ha sido ejecutado múltiples veces. Consideremos por ejemplo dos buenos relojes que se sincronizan en el marco de referencia de la Tierra, en el primer piso de un edificio de diez pisos. Si ahora llevamos uno de ellos al piso diez y lo dejamos ahí 24 horas, por ejemplo, y después lo regresamos al primer piso para comparar las lecturas de los relojes, encontraremos que hay una diferencia entre la hora que marcan ambos relojes. Observaremos que el reloj que fue llevado al décimo piso y regresado para compararlo con el otro, se ha adelantado. La diferencia es muy pequeña, pero con la precisión que han alcanzado los instrumentos en la actualidad, esta ha podido ser medida. La explicación de esto se encuentra en la teoría general de la relatividad de Einstein. Proviene del resultado de que en un campo gravitacional intenso los relojes marchan más lentamente que en un campo gravitacional de menor intensidad. En nuestro caso, en el décimo piso la intensidad del campo gravitacional de la Tierra es menor que en el primer piso. De aquí el resultado mencionado de que el reloj que movimos al decimo piso se adelantó.

Este hecho no es solo un resultado teórico comprobado experimentalmente, sino que es utilizado en la tecnología moderna. En los aparatos de localización que utilizamos, los GPS'es que están integrados a los teléfonos celulares y que usamos diariamente. Los satélites usados para ubicarnos aplican estos resultados de la TGR. Las señales que nos envían son corregidas de acuerdo con la altura a la que se encuentra cada satélite. Como sabemos, los automóviles autónomos que no usan conductor, usan los sistemas de información satelital. Si los carros autónomo siguiera instrucciones de satélites de ubicación GPS que no tomaran en cuenta este cambio en la medición del tiempo, los carros chocarían.

Para estudiar la teoría de la relatividad en un adecuado marco de referencia, Minkowski introdujo el concepto de un hiper-espacio de cuatro dimensiones donde la cuarta dimensión es el tiempo. En este sentido, el tiempo de la relatividad especial, es la cuarta componente de un

espacio-tiempo de cuatro dimensiones. El tiempo físico medido por un reloj está dado por el tiempo propio, descrito como $d\tau = \frac{1}{c} \sqrt{ds^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} dt$, donde v , es la velocidad del reloj respecto a un marco de referencia inercial. En el caso de la relatividad general, $d\tau^2 = \frac{1}{c^2} ds^2 = \frac{1}{c^2} \left\{ \left(1 + \frac{2\varphi}{c^2}\right) c^2 dt^2 + d\vec{r}^2 \right\}$, siendo $\varphi(x, y, z)$ el valor del campo gravitacional en el punto indicado. Si el reloj está en reposo en el campo gravitacional φ entonces $d\vec{r} = 0$, y obtenemos que el tiempo $d\tau$ medido por el reloj está dado por $d\tau = \sqrt{1 + \frac{2\varphi}{c^2}} dt$. Puesto que para un campo estático $\varphi = -\frac{GM}{r}$, siendo G la constante de la gravitación universal, M la masa que origina el campo y r la distancia a la que se encuentra colocado el reloj del centro de la distribución esférica de masa. Encontramos que el reloj marcha más lentamente en presencia de un campo gravitacional que sin él.³

En general, podemos establecer que no existe un tiempo universal. En la teoría de la relatividad la presencia de materia afecta al tiempo, así como también lo afecta el movimiento relativo de los relojes.

Cuanto más nos acerquemos a un cuerpo astronómico, los relojes marcharán más lentamente. En el extremos de los cuerpos compactos, están los agujeros negros (AN). En el límite de proximidad a un AN, en el horizonte de eventos, por la parte exterior a un agujero negro los relojes se detendrán. Si pudiéramos acercarnos en una nave espacial a un AN lo suficiente, pero por supuesto siempre fuera del horizonte de eventos, y permaneciéramos ahí durante una hora en nuestro reloj, al regresar a la Tierra, aquí habrían pasado cientos de años. En este sentido aseguramos que es posible viajar al futuro.

Similarmente dos relojes, uno fijo y el otro moviéndose respecto al primero, al comparar los intervalos de tiempo medidos por cada uno de ellos, encontramos que el que el reloj que se mueve marcha más rápidamente que el que permanece estacionario.

LA FLECHA DEL TIEMPO

Un aspecto interesante de las leyes de la física es que son invariantes ante inversiones en el tiempo. En las teorías fundamentales de la física como la mecánica clásica o la teoría electromagnética o la mecánica cuántica no hay distinción entre el pasado y el futuro. En el Modelo Estándar que es la teoría más acabada de la física hasta ahora, sus leyes son invariantes ante el cambio de $t \rightarrow -t$. Hasta aquí, las leyes de la física no incorporan ninguna información sobre la dirección del tiempo.

En el sistema solar, por ejemplo, no podemos distinguir el pasado del futuro. La descripción del movimiento de los cuerpos que forman el sistema solar no se modifica si cambiamos t por $-t$. Esto se debe a que es un sistema de muy pocos cuerpos que se describe mediante las leyes de Newton y estas son invariantes ante la inversión del tiempo. En la microfísica no se distingue el pasado del futuro. La distinción solo ocurre en el mundo macroscópico relacionado con la entropía.

La termodinámica en su segunda ley, es la que establece la flecha del tiempo en la ciencia. Boltzmann al introducir la física estadística dejó establecido que la distinción entre presente y

pasado es una propiedad estadística del comportamiento de la materia. El concepto que distingue el pasado del futuro en física es la entropía.

EL TIEMPO Y LA PERCEPCIÓN HUMANA

La percepción humana del tiempo es un acto o un proceso donde necesariamente interviene un fenómeno relacionado con un cambio. Lo ejemplificaremos con el movimiento de una partícula al considerar la posición en un instante y su posición en otro instante posterior. Si nosotros no tuviéramos memoria no percibiríamos el movimiento, solo registraríamos posiciones distintas en una escala espacial.

El cerebro humano resulta ser a la vez que un detector de posiciones, también integra e interpreta la evolución de las posiciones de la partícula creando así la sensación de movimiento y dando origen al concepto de tiempo. En este sentido el tiempo resulta ser una invención humana que no tiene existencia física. El tiempo es una experiencia humana, no algo objetivo, físico, que sea independiente del cerebro humano.

Un conjunto de estados, cada uno estático, dan la impresión de movimiento, es decir, el cerebro genera o introduce una nueva variable, el tiempo, originada en nuestra capacidad de memoria. Consideremos, por ejemplo, el fenómeno físico detrás del cine. Al proyectarse una película en una pantalla, lo que observamos es una sucesión de fotos fijas dando la impresión de movimiento. Esta sensación de movimiento se produce como consecuencia de la intervención de nuestra mente, de nuestra capacidad de memoria.

Algo semejante al fenómeno visual asociado al cine ocurre con nuestro sistema auditivo. Una pieza musical se aprecia debido a la sucesión de sonidos u ondas auditivas que son integradas en nuestra mente por nuestro cerebro debido también a la memoria.

El cerebro del ser humano no registra simplemente la información que recibe de los sentidos (la vista, el oído, etc.), sino que interpreta e introduce elementos adicionales a la sola señal luminosa o auditiva. Esto es esencialmente lo que ocurre al construir en la mente la percepción del tiempo.

¿Qué es lo que vemos, longitudes de onda o imágenes?, la misma pregunta para los sonidos, ¿Qué es lo que oímos, longitudes de onda o sonidos?. Supongamos que escuchamos las voces de varias personas a la vez. Nosotros tenemos la capacidad de seleccionar cualquiera de ellas y escuchar lo que dice solo una persona, aun cuando todas las vibraciones lleguen a nuestro oído al mismo tiempo. Con este ejemplo, encontramos que nuestro oído combinado con el funcionamiento del cerebro da como resultado la percepción auditiva. Lo mismo ocurre con la percepción visual.

Concluimos que la percepción del tiempo, como la auditiva y visual, está integrada por varios elementos psíquicos en los que interviene la memoria humana. ¿Qué pasaría si no tuviéramos memoria? Esta pregunta se antoja hacerla debido que queremos construir teorías físicas objetivas, independientes de la conciencia humana o de factores psicológicos. Esta línea de razonamiento, nos lleva al propósito de lograr construir una teoría física objetiva, sin que participen factores subjetivos. Por lo tanto, esta teoría física no debería contener la variable tiempo.⁴

Los fenómenos de ilusión óptica nos indican que nuestros sentidos pueden engañarnos. Lo que se busca al elaborar una teoría física es que esté a salvo de los efectos psicológicos, es decir evitar la influencia de lo que nuestro cerebro interpreta y que da lugar a las ilusiones ópticas y auditivas.

LA TEORÍA CUÁNTICA DE LA GRAVEDAD Y LA UNIFICACIÓN DE TODA LA FÍSICA

La física pretende ser totalmente objetiva, que ningún elemento psicológico, como preferencias o interpretaciones esté presente en las teorías físicas. El concepto tiempo, por lo que hemos mencionado, tiene importantes elementos psicológicos. Por esta razón se busca construir una teoría física sin tiempo. La percepción humana, la cual tiene fuertes elementos subjetivos, no debe aparecer en la estructura de una teoría física. La percepción humana, como ya lo dijimos, incluye en la observación muchos ingredientes psicológicos, que una teoría física debe eliminar.

Una teoría física debe contener solamente lo que se registra en un aparato, y no deben entrar en ella elementos o factores de naturaleza psicológica. Hay algunos científicos que piensan que no se ha logrado construir la Teoría Cuántica de la Gravedad (TCG), debido a que no se ha eliminado el tiempo en las formulaciones que se han intentado. La opinión de algunos científicos, líderes en la búsqueda de una TCG, establecen que esta se logrará desarrollar cuando se tenga un formalismo matemático donde el tiempo quede excluido.⁵

LOS VIAJES EN EL TIEMPO

El tema de los viajes en el tiempo ha sido tradicionalmente considerado como un asunto de la ciencia de ficción o la fantasía. Sin embargo, la física moderna se ocupa hoy de este tema como una cuestión estrictamente científica.

A semejanza de las fantasías de la literatura sobre alfombras mágicas o bolas de cristal, que hoy vemos materializadas en los aviones y en la televisión, es probable que los viajes en el tiempo sean también una realidad dentro de quinientos o mil años.

De acuerdo con lo que hoy sabemos de la física, es posible que la tecnología del futuro haga realidad los viajes en el tiempo. Si nos adentramos en los fundamentos de la física que hoy conocemos, los viajes en el tiempo no son imposibles.

Sin pretender asegurar que en el futuro se lograrán estos viajes en el tiempo, la idea es establecer que la física no los prohíbe. Un principio de la física asegura que lo que no está prohibido por las leyes de la naturaleza, seguramente ocurrirá. Ese es el criterio aplicado para cualquier fenómeno o proceso que no se ha observado pero que no está prohibido por las leyes de la naturaleza. En el caso de los viajes en el tiempo, si este es el caso, la limitación es actualmente de tipo tecnológico.

La historia de la ciencia está llena de anécdotas sobre opiniones negativas y pesimistas de connotados científicos sobre el futuro de la ciencia y la tecnología. Esto debe normar nuestra forma de pensar antes de descartar un desarrollo científico o tecnológico. Los alquimistas pensaban en descubrir la Piedra Filosofal, algo que sería capaz de convertir los metales sin valor como el plomo, en oro. Un sueño que se consideró imposible. Actualmente esto es una realidad

en los laboratorios de física nuclear donde la conversión o transmutación de unos núcleos atómicos en otros, se realiza mediante el bombardeo con partículas.

Stephen Hawking intentó probar que los viajes en el tiempo son imposibles. Buscaba encontrar una ley de la física que impidiera estos viajes. Trataba de demostrar que existe una línea cronológica en los acontecimientos o eventos, como se les llama en la física, que no puede ser modificada. Su intento no tuvo éxito y terminó él mismo aceptando la posibilidad de los viajes en el tiempo. Su idea de viajes al pasado la sustentó en la teoría de cuerdas llamada teoría M. De acuerdo con el conocimiento científico presente, no podemos excluir la posibilidad de los viajes en el tiempo, escribió en su libro póstumo "Brief Answers to the Big Questions". <http://xn--webeducation-dbb.com/wp-content/uploads/2019/01/Stephen-Hawking-Brief-Answers-to-the-Big-Questions-Random-House-Publishing-Group-2018.pdf>.⁶

La conclusión, basada en los principios de la física, en concordancia con el principio de legalidad que establece que todo lo que no está prohibido, está permitido, es que si algún fenómeno o proceso no está prohibida por las leyes de la naturaleza, este fenómeno ocurrirá, tarde o temprano. Puede ser dentro de cien años, o mil o un millón de años, pero sucederá.

VIAJES AL FUTURO

El viaje al futuro es un asunto cotidiano de acuerdo con la teoría de la relatividad. Al movernos en una nave o un avión, estamos viajando hacia el futuro de acuerdo con nuestro reloj biológico, ya que los relojes marchan más lentamente que los relojes en reposo. Al comparar los dos tiempos en los marcos de referencia respectivos, encontramos que el reloj que se mueva viaja hacia el futuro ya que encuentra cosas en el futuro para su tiempo propio. La vida de un individuo que viaja se prolonga respecto a su vida en reposo. En este sentido se adelanta a su propio tiempo, es decir, viaja al futuro. Un futuro que no hubiera podido ver o vivir si no hubiera estado en movimiento.

El problema de viajar al futuro es que ya no se puede regresar al tiempo regular, digámoslo así. Un viajero espacial que viaje durante un año, puede regresar a la Tierra donde han transcurrido, cinco o diez o más años. Una vez en la Tierra, ya no puede regresar a su tiempo, a su generación, es decir, al pasado.

La Teoría Especial de la Relatividad (TER) ha establecido firmemente que se puede viajar al futuro, lo cual ha sido comprobado en múltiples experimentos. Como ya se mencionó, un reloj en movimiento marcha más lentamente que uno estacionario. Esto se comprueba en experimentos con partículas inestables. Una partícula inestable tiene un tiempo de vida promedio de un cierto valor. La partícula se crea en un instante determinado y después de su tiempo de vida media, en términos estadísticos, se desintegra. Podemos calcular, mediante una estimación sencilla qué distancia puede recorrer esta partícula antes de desintegrarse. Un ejemplo de esto son las partículas llamadas muones, que se producen en las capas superiores de la atmósfera a mucho más de 6,000 metros de la superficie del mar. La vida media de estas partículas es de 2×10^{-6} segundos. En este tiempo, moviéndose a la velocidad de la luz, recorrerían cuando mucho 600 metros. Sin embargo, se les detecta al nivel del mar, a seis mil metros de donde se crearon. La explicación de esto es el fenómeno conocido en la relatividad como dilatación de tiempo. Esto significa que aun cuando en el "reloj" del muon hayan

transcurrido menos de 2×10^{-6} segundos, para un observador en la Tierra transcurrió un tiempo diez veces mayor.

Pensemos que el muon tiene un reloj integrado a sí mismo. El resultado anterior es equivalente a que antes de morir pudo vivir diez veces más tiempo que el que le corresponde a su vida media. Extendamos la idea a una persona que viaja desde algún punto del espacio hacia la tierra durante un año en su propio reloj, marcado por los latidos de su corazón. Este año es lo que ha envejecido el viajero. Dependiendo de la velocidad con la que esté viajando, puede ocurrir que aquí en la Tierra hayan transcurrido, por ejemplo, veinte años o cincuenta, por ejemplo. En este sentido el viajero viajó al futuro, cuarenta y nueve años o 99, según el caso.

Los relojes atómicos son los más precisos de entre todos los relojes. Con estos instrumentos somos capaces de medir la variación en tiempo entre el tiempo medido por un reloj de pulso usado por un astronauta en un viaje y el tiempo registrado por un reloj aquí en la Tierra.

Por otra parte, la TGR establece que el tiempo no es universal y que cada planeta o estrella dependiendo de su campo gravitacional tiene su propio tiempo.

En síntesis, los viajes al futuro, no presentan ninguna dificultad conceptual que contravenga ni la lógica ni lo que hoy sabemos científicamente.

POSIBILIDAD DE VIAJAR AL PASADO

Las dos teorías fundamentales de la física, son la Teoría General de la Relatividad (TGR) y la Mecánica Cuántica (MC). La TGR admite soluciones de las ecuaciones de Einstein que son cíclicas en el tiempo, lo que implica que la teoría no prohíbe que se puede viajar en el tiempo. Sin embargo, existen contradicciones lógicas que deben superarse si se admite científicamente que esta posibilidad sea real.

En una histórica conferencia dictada en 1949 por el distinguido matemático Kurt Goedel, en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, EUA, presentó una prueba matemáticamente, basado en la teoría de Einstein de la relatividad general, de que el tiempo es cíclico y que lo que en este momento estamos viviendo, se repetirá exactamente igual, con los mismos protagonistas, usted leyendo este texto, en el mismo lugar en el que ahora lo hace y rodeado del mismo entorno, dentro de miles de millones de años. Algo que parece escalofriante.⁷

Impactado por el resultado obtenido por Goedel, Einstein recurrió a la filosofía para descartar el resultado. Su argumento fue que ante resultados matemáticos que choquen con la experiencia, se debe recurrir a la intuición. Einstein, que creía en la realidad última del espacio-tiempo recurría ahora a la intuición para desechar el resultado, no físico según él, obtenido por Goedel.

Motivado por este resultado, Goedel buscó establecer cuáles son los límites de la matemática. Cuando su uso conduce a resultados que contradicen conceptos intuitivos. Esto nos lleva de nuevo a uno de los problemas filosóficos fundamentales de la ciencia. A quién creer o en qué basarnos para construir el conocimiento, una estructura teórica confiable que describa la realidad física. Esta situación presenta la disyuntiva filosófica del racionalismo contra el empirismo.

Estas soluciones de las ecuaciones de Einstein que permiten viajar al pasado, son llamadas Curvas Temporales Cerradas o Closed Timelike Curves (CTC), son físicamente aceptables. El problema que se tiene ahora, es el de resolver los problemas lógicos que se presentan al viajar al pasado, como la paradoja de abuelo, de la que hablaremos enseguida.

LA PARADOJA DEL ABUELO

El primer punto escabroso sobre los viajes al pasado es el hecho fundamental de que el pasado no puede ser modificado y alguien que viaje al pasado puede alterar alguna cosa que haría que el presente no fuera posible como lo vemos actualmente. Este es el origen de la muy conocida Paradoja del Abuelo. La esencia de esta paradoja es que un viajero que va hacia el pasado se encuentre con uno de sus ascendientes, es decir, con una persona de su árbol genealógico y lo mate. Esta posibilidad provocaría una contradicción entre el presente y el pasado. Descender de alguien que murió antes de tener hijos y por lo tanto ser hijo de alguien que nunca existió es una contradicción lógicamente inaceptable.

Cualquier cosa que haga una persona que viaje al pasado puede inhibir algo que está conectado causalmente con el presente y por lo tanto muchas cosas del presente deberían desaparecer instantáneamente. La misma posibilidad de que el viajero asesine a su abuelo destruye el argumento de que viaje alguien que no existiría. Esta contradicción lógica se ha usado para invalidar la posibilidad de viajar en el tiempo hacia el pasado.

Los intentos actuales para explicar y resolver los problemas de los viajes al pasado, se centran en encontrar una salida a la paradoja del abuelo. El camino que se ha seguido es el de buscar en la mecánica cuántica una justificación y poder hacer a un lado la paradoja del abuelo. Puesto que la mecánica cuántica es una teoría no causal, es decir, no tiene validez el principio de causalidad, es posible encontrar una salida al problema de la paradoja.⁸

LA MECÁNICA CUÁNTICA

Es importante establecer que en la mecánica cuántica la intuición no es un recurso mental de confianza. Los extraños y misteriosos aspectos de la mecánica cuántica hacen de ella un asignatura difícil de entender. Las paradojas que se presentan en el planteamiento de los viajes en el tiempo, como la paradoja del abuelo, son resueltas por la mecánica cuántica. Esto se explica al considerar los postulados de la mecánica cuántica, donde se establece que en una medición se produce el efecto de colapso de la función de onda en el estado que arroja la medición. La realidad no es independiente del observador. El observador perturba al sistema.

Existen dos tipos de soluciones a las contradicciones que se presentan al viajar al pasado. Uno de los tipos se clasifica en imponer restricciones a lo que es posible que el viajero en el tiempo puede hacer. Todo aquello que entre en contradicción lógica con el futuro no lo puede hacer el viajero en el tiempo.

El otro tipo de solución a las contradicciones lógicas es que cuando el viajero regrese aparecerá en un universo paralelo. Esto es, regresa a un futuro alternativo. Esta posibilidad está aceptada por la mecánica cuántica. En estos casos el viajero puede interactuar consigo mismo en el pasado pero todo debe ser consistente con el futuro. Por ejemplo, el viajero no puede matar a un

antepasado suyo. La explicación a esto es que si el viajero pretende hacerlo, entonces en el momento de intentar matar a su abuelo, por ejemplo, ocurrirá una fluctuación cuántica que impide hacerlo, haciendo que falle, por ejemplo la pistola con la que lo iba a matar.

Existe un tipo de paradoja relacionada con problemas matemáticos. Esta es conocida como la paradoja del teorema no probado. Por ejemplo un teorema se prueba y se escribe en un libro que una persona lee. Esta persona viaja al pasado y le muestra la demostración a un matemático. El matemático incluye esta demostración en un libro de su autoría, y este libro resulta ser el mismo en el que el viajero lo leyó. La paradoja reside en que el viajero obtuvo la demostración del teorema de algo que no existía. Pero en esencia esta es la misma paradoja que la del abuelo, ya que al encontrar él a su abuelo el viajero nació de alguien, su padre, que todavía no existía. Lo mismo la demostración del teorema, se obtuvo de algo que no existía. Ambas situaciones resultan ser esencialmente el mismo problema.

Todos los tipos de paradojas que se han encontrado, son esencialmente del mismo tipo de la del abuelo. La mecánica cuántica resuelve todos estos tipos de paradojas. Sea suponiendo la existencia de muchos universos (universos paralelos), también llamada versión de muchos mundos, o la hipótesis de NOVIRKOV.⁹

Lo importante de la incorporación de la mecánica cuántica a una teoría general de la relatividad es que se resuelven las paradojas que se presentan en los viajes al pasado, como la paradoja del abuelo. Al permitir la TGR las soluciones CTC y además se incorporan en la TGR las ideas de la mecánica cuántica, el asunto de los viajes al pasado resultan en una posibilidad real.¹⁰

PRINCIPIO DE CAUSALIDAD

Por otra parte, el principio de causalidad establece que una causa precede siempre a un efecto. Si este principio, que no es una ley de la naturaleza o que se derive de las leyes fundamentales de la física, es verdadero, entonces los viajes en el tiempo adolecen de una fuerte contradicción lógica. La paradoja llamada del abuelo, anularía la posibilidad de los viajes en el tiempo. Esta paradoja está basada en la validez del principio de causalidad, donde la línea de tiempo debe respetarse rigurosamente. Es decir, primero nace el abuelo, luego su padre y después el viajero. Si el abuelo no existió entonces no puede existir el viajero.

La salida al problema de la paradoja del abuelo está en que la mecánica cuántica es una teoría no causal. Por lo tanto la línea de tiempo no se respeta en el comportamiento cuántico, Este hecho es el que ha abierto la posibilidad del estudio científico de los viajes en el tiempo. Si en la mecánica cuántica no se cumple el principio de causalidad, entonces los viajes al pasado son posibles.

Los viajes en el tiempo han sido tratados en los libros de ciencia de ficción y en películas de fantasía y ciencia ficción. Lo que se concluye de este artículo que aborda la parte científica del tema, es que, como se dice usualmente, los viajes en el tiempo son un asunto de tiempo.

PRINCIPIO DE NOVIKOV

El Principio de Novikov establece que no puede ocurrir que al viajar al pasado el viajero realice una acción que implique una violación o alteración del futuro que se está viviendo. Este principio implica que solo hay una línea de tiempo y no podemos alterarla al viajar al pasado. Si ocurriera que se violara el principio de Novikov y pudiéramos alterar la línea de tiempo, la consecuencia, según la mecánica cuántica, es que caeríamos en un universo paralelo. Esto significa que el viajero viviría ahora en un universo distinto y desconectado causalmente del universo de donde partió.¹¹

Es así como el Principio de Novikov, establece que el futuro es inmutable si ya ocurrió. Existe una conjetura planteada por Hawking, conocida como Chronology Protection Conjecture, la cual establece que el principio de causalidad siempre será preservado. Si no ocurre así, el universo resulta ser inestable y se colapsaría en forma catastrófica. Cada momento es único y no se repetirá jamás.¹²

Las leyes de la mecánica cuántica resuelven el problema de la paradoja del abuelo y, en principio, permiten los viajes al pasado. El concepto de múltiples líneas de tiempo donde un suceso ocurre de dos o más formas distintas determina las formas diferentes en las que evolucionaron los acontecimientos.

Si aceptamos una teoría que respete el principio de causalidad, los viajes al pasado quedan prohibidos por la misma teoría. Sin embargo, considerando que la teoría cuántica es una teoría no causal, se abre la posibilidad de los viajes en el tiempo.

En general, si las leyes que gobiernan los procesos de la naturaleza están regidas por el principio de causalidad, entonces los viajes al pasado no son posibles. La mecánica cuántica no respeta el principio de causalidad, por lo tanto, las leyes de la mecánica cuántica no prohíben los viajes al pasado.

MAQUINAS DE TIEMPO GRAVITACIONALES

Hawking, quien no creía en la posibilidad de los viajes en el tiempo, se convenció de que, de acuerdo con las teorías físicas actuales, estas no prohibían los viajes en el tiempo y que las soluciones CTC (Closed Timelike Curves) son físicamente aceptables. Una curva temporal cerrada es una manera de decir, en el lenguaje de la teoría general de la relatividad, que se puede viajar en el tiempo, particularmente al pasado. Una curva temporal cerrada es una solución matemática, físicamente aceptable de las ecuaciones de campo de la relatividad general, en la cual, la línea mundo o la línea que sigue un objeto (una persona) en el espacio-tiempo, sigue una trayectoria que lo lleva al mismo punto en el pasado. En consecuencia, el objeto (la persona) viaja al pasado.^{13,14}

Para evitar el problema de la paradoja del abuelo, sin considerar las teorías cuánticas, Hawking introdujo una conjetura llamada Chronology Protection Conjecture. Esta conjetura la estableció Hawking para prevenir que se cambie el pasado. Algo debe evitar que alguien viaje al pasado y produzca un cambio que altere la línea cronológica. Esta suposición de Hawking lleva implícita la idea de que el viajero es parte del pasado y no puede alterarlo. Al ser la línea mundo del viajero una línea cerrada, esta lo llevará al mismo punto del espacio-tiempo en el futuro. Por lo tanto no producirá ninguna alteración. Esta fue la idea de Hawking al imponer su conjetura de la protección cronológica.

La física de los agujeros de gusano establece que los agujeros de gusano son el equivalente a máquinas para viajar en el tiempo.¹⁵ La posibilidad de construir una máquina del tiempo de agujeros de gusano sin ser despedazados depende de las leyes que gobiernen la teoría caótica de la gravedad, las cuales todavía no conocemos.¹⁶

Cualquier cosa que no esté prohibida por las leyes de la naturaleza será lograda con las tecnologías del futuro, por más imposible que parezca. No olvidemos que la civilización puede durar miles de años más.

El futuro del ser humano

Muy probablemente dentro de doscientos años, el ser humano como lo conocemos ahora desaparecerá. Serán seres formados por otros materiales, con un cerebro, que es donde radica la esencia del ser humano, que tendrá componentes materiales inorgánicos donde se almacenará información y conocimientos. El ser biológico que somos en la actualidad se habrá transformado. Estará repleto de prótesis que mejoren nuestros sentidos actuales, visión, audición, olfato, gusto y tacto y nuestra memoria también será mejorada.

Un ser humano inorgánico reemplazará al ser humano biológico, orgánico. Con el desarrollo de las tecnologías de la información y de la inteligencia artificial, el hombre del futuro, transformado por la ingeniería genética, o la ingeniería biológica, será totalmente diferente a nosotros.

El hombre del futuro cambiará su propio ADN con lo cual transformará sus capacidades mentales y físicas. Los grandes problemas del ser humano del futuro serán de naturaleza ética y moral, es decir, cómo legalizar o legislar lo que se puede hacer y lo que no se permite, con un ser humano desde su embrión. Las leyes que hoy nos gobiernan quedarán muy por detrás de los avances tecnológicos y las posibilidades de hacer cambios en nuestro cuerpo, nuestra mente y nuestro ADN quedarán limitados por las leyes que nosotros mismos imponemos.

Modificando el ADN de cualquier animal, podemos crear uno nuevo, mejorado, en el sentido de que sea más inteligente o más fuerte o más resistente a las enfermedades y las plagas. Esto ya se hace con plantas, las famosas plantas transgénicas. El mundo del futuro se puede ya vislumbrar para dentro de 50 años, pero el de aquí a cien años, aun con la que ya tenemos de tecnología genética y biología molecular, no podemos siquiera imaginarlo.

Podremos tener nano-robots que se inyectan al cuerpo y circular por el sistema sanguíneo y detecten enfermedades o virus que ocasionan enfermedades y destruirlos. Esto sería una especie de sistema inmunológico externo, agregado a nuestro sistema inmunológico natural.

Con toda esta nueva tecnología del futuro, ¿Serán posibles en el futuro los viajes en el tiempo, al pasado? Si el problema es de tipo tecnológico, desde ahora podemos afirmar que sí serán posibles. Esta afirmación se hace basada en que la tecnología seguirá avanzando y lo que hoy nos parece imposible, como ha ocurrido en la historia de nuestra civilización, en el futuro será logrado, materializándose en hechos concretos. La limitación queda impuesta por las leyes de la naturaleza, no de la tecnología. Pensemos en la tecnología que habrá desarrollado el ser humano en los siguientes cinco mil años, por ejemplo. ¿Pensaremos que no lograremos algo que la naturaleza no lo prohíba?. Históricamente se ha probado que lo que parecía imposible se ha vuelto realidad.

La tecnología que se requiere para realizar viajes en el tiempo está muy lejos de ser alcanzada, pero posiblemente dentro de mil años o más se logrará desarrollar.¹⁷

Epílogo

Quienes trabajan en la teoría cuántica de la gravedad pretenden construir una ecuación cuántica relativista que no contenga el tiempo como variable. La pretensión de eliminar el tiempo es debido a que este concepto no tiene un significado físico importante. Solo cuando se incluye la entropía o el calor el concepto tiempo es realmente fundamental. Parece ser que el camino para construir una teoría cuántica de la gravedad es eliminar la variable tiempo de la formulación matemática.

La idea de que el tiempo pasa o fluye lo hace diferente al espacio, el cual no tiene intuitivamente el carácter de algo que fluye o pasa. Un lugar físico en el espacio está ahí y no cambia su localización, mientras que un instante de tiempo pasa y se pierde para siempre. ¿Es esto correcto?. ¿Existe un reloj cósmico universal que marque el tiempo igual para todos? No, no existe. El tiempo es relativo. ¿El pasado ya no existe en el mundo?, es decir ¿ha desaparecido el pasado?. No lo sabemos.

Los avances en el conocimiento científico que ya tenemos actualmente son tan impresionantes que la tecnología que con ellos se puede desarrollar no la podemos siquiera imaginar ahora. Aun hoy que estamos padeciendo la pandemia del Covid 19, podemos decir que es muy probable que dentro de cien años hayan desaparecido la mayoría de las enfermedades que hoy tenemos, como las enfermedades cardíacas, degenerativas, mentales, y muchas otras. El desarrollo de la inteligencia artificial, la robótica, la medicina, la biología y la física nos permitirá prolongar la vida de los seres humanos mucho más allá de los cien años.

Hay cosas muy interesantes, basadas en la ciencia, que se están haciendo en la actualidad para intentar esta aventura de viajar en el tiempo. Una cosa valiosa se debe sacar de esto: debido a lo apasionante del tema, muchos jóvenes se interesarían por estudiar ciencias y ya con esto el mundo sería mejor.

BIBLIOGRAFÍA

1. Smolin, Lee, (2001), Three Roads to Quantum Gravity, Basic Books, USA.
2. Rovelli, Carlo, (2017), Reality is not what it Seems, Riverhead Books, USA.
3. Schutz, Bernard, (2002), A First Course in General Relativity, Cambridge university Press, UK.
4. Yourgrau, Palle, (2005), A World Without Time, Basic Books, USA.
5. Rovelli, Carlo, (2007), Quantum Gravity, Cambridge University Press, UK.
6. Hawking, Stephen (2018), Brief Answers to the Big Questions <http://xn--webeducation-dbb.com/wp-content/uploads/2019/01/Stephen-Hawking-Brief-Answers-to-the-Big-Questions-Random-House-Publishing-Group-2018.pdf>.
7. (Rindler, Wolfgang, 2009). American Journal of Physics 77, 498 (2009), DOI: <https://doi.org/10.1119/1.3086933>

8. Bruce, Colin, (2004), *Schroedinger's Rabbits*, Joseph Henry Press, USA.
9. Costa F. and Shrapnel S. (2016), *Quantum Causal Modelling*, New J. Phys. 18 063032.
10. Pegg, D. T., (2001). *Quantum mechanics and the time travel paradox Time's Arrows, Quantum Measurement and Superluminal Behavior* ed D Mugnai, A Ranfagni and L S Schulman (Roma: Consiglio Nazionale Delle Recherche) p 113.
11. Novikov, I. D., (1989), *An analysis of the operation of a time machine* Soviet Phys. JEPT 68 439–43.
12. Hawking, S. W., (1992). *Chronology protection conjecture* Phys. Rev. D 46 603–11.
13. Alcubierre, M., (1994), *The warp drive: hyper-fast travel within general relativity* Class. Quantum Grav. 11 L73–7.
14. Tobar, Germain and Costa, Fabio, *Classical and Quantum Gravity*, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6382/aba4bc/pdf>.
15. Visser, Matt, *Nuclear Physics B*, April, 1994, Pages 895-906.
16. Morris, M. S. and Thorne, K. S. *Scientific American*, (2002).
17. Michio Kaku, (2008), *Physics of the Impossible*, Anchor Books, USA.

Colaboradores

Chacón Rendón, César de Jesús

Bachiller técnico en Diseño y Comunicación Visual (2016), en la Escuela Industrial y Preparatoria Técnica Pablo Livas. Fue estudiante del programa Ingeniero en Electrónica y Automatización, en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Elizondo Martínez, Antonio

Estudió en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (UANL). Durante los estudios de posgrado trabajo en la caracterización de materiales poliméricos compuestos reforzados con grafeno y derivados del carbón.

Guerrero Salas, Tania E.

Profesora adscrita al área de Ciencias Básicas de FIME, actualmente escribiendo su tesis que la conducirá a la obtención del grado de Doctor en Ingeniería con orientación en Materiales. Cuenta con varios artículos científicos arbitrados así como un par indexados.

Guerrero Salazar, Carlos A.

Profesor Investigado adscrito al posgrado en Ingeniería de Materiales de FIME. Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias, cuenta con el Perfil Prodep. Posee más de 50 artículos en revistas indexadas y más de 800 citas a sus trabajos.

Hinojosa Rivera, Moises

Doctor Ingeniería de Materiales. Investigador Nacional SNI 1. PTC en FIME-UANL desde 1998. Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Sus líneas de investigación se centran en el

comportamiento mecánico de metales y la fractura de materiales en general. También desarrolla proyectos en líneas de nanotecnología.

Lopez-Cruz, Pedro

Doctor en Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Carleton, Canadá. PTC de la FIME.UANL desde 2008. LGAC's en diseño, análisis y caracterización de estructuras aeronáuticas con materiales compuestos. Actualmente coordinador de la maestría y doctorado en Ingeniería Aeronáutica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Llamas Hernández, Mayra

Doctora en Automatización por la l'Université de Bourgogne et Franche-Comté, Francia. Doctora en Ingeniería de Materiales por la UANL, México. Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales por la UANL en conjunto con l'Ecole Polytechnique de Montréal, Canadá. Ingeniero en Mecatrónica por la UANL. Actualmente colaborando en el centro de investigación y desarrollo, Schneider Electric.

Morones Ibarra, José Ruben

Es Licenciado en Ciencias Físico-Matemáticas por la Universidad Autónoma de Nuevo León. Obtuvo el Doctorado en Física en el área de Física Nuclear Teórica, por la University of South Carolina, USA. Actualmente es profesor investigador de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la UANL. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores con Nivel I y es Miembro Regular de la Academia Mexicana de Ciencias.

Reyes Melo, Martín Edgar

Ingeniero en Industrias Alimentarias (UANL). Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, especialidad en Materiales (UANL). Doctorado en Ciencia de Materiales, Universidad Paul Sabatier, Toulouse, Francia. Premio de Investigación UANL en 1999, 2004, 2009, 2011 y 2012. Profesor investigador UANL. SNI nivel II. Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias.

Rodríguez Cruz, Francisco Antonio

Fue estudiante del programa Ingeniero en Electrónica y Automatización, en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Rodríguez-Liñán, Juan Ángel

Doctor en Ingeniería Eléctrica (2009) por la UANL, es Profesor de Tiempo Completo en la FIME, UANL. Obtuvo el Premio de Investigación UANL 2009. Actualmente es el líder del Cuerpo Académico Tecnología e Innovación Mecatrónica. Desde 2011 es reconocido por PRODEP y actualmente es

nivel I en el SNI. Sus áreas de interés son análisis, estimación, instrumentación y control en sistemas dinámicos, robótica y biomecatrónica.

Salazar-Colunga, Rodrigo

Ingeniero Mecánico Administrador, FIME-UANL. Estudiante de maestría en Ingeniería Aeronáutica. Estancia de maestría en el laboratorio HolSIP (Holistic Structural Integrity Process lab) de la Universidad de Clarkson, USA. Intercambio Alemania, en la Universidad de Ilmenau realizando pruebas de vibraciones y acústica en la empresa BMW.

Villalobos-Luna, José de Jesús

Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Especialidad en Diseño por la FIME-UANL. PTC de la FIME-UANL desde 2005. Experto en pruebas mecánicas y análisis de vibraciones para caracterización estructural. Miembro del CAEC Diseño y Análisis de Estructuras. LGAC's en diseño, análisis y caracterización de estructuras, daño en uniones adhesivas.

Información para colaboradores



Se invita a profesionistas, profesores e investigadores a colaborar en la revista *Ingenierías* con: artículos de divulgación científica y tecnológica, artículos sobre los aspectos humanísticos del quehacer ingenieril y reportes de investigación.

El envío de artículos a la revista *Ingenierías* para su publicación implica el ceder los derechos de autor a la UANL.

Es requisito que las colaboraciones sean producto del trabajo directo de los autores estableciendo claramente su contribución; y que estén escritas en un lenguaje claro, didáctico y accesible. Las contribuciones no deberán estar redactadas en primera persona.

Todos los artículos recibidos estarán sujetos a arbitraje de tipo doble anónimo siendo el veredicto inapelable. Los criterios aplicables a la selección de textos serán: originalidad, rigor científico, exactitud de la información, el interés general del tema expuesto y la claridad del lenguaje. Los artículos aprobados serán sujetos a revisión de estilo.

CRITERIOS EDITORIALES

Los autores de artículos de revisión o divulgación deberán contar con una producción directa reconocida en la temática de interés de la revista. Estos trabajos deben ofrecer una panorámica del campo temático, separar las dimensiones del tema, mantener la línea de tiempo y presentar una conclusión que derive del material presentado.

Las contribuciones sobre modelación y simulación deben estar científicamente dentro del propio trabajo.

Los trabajos con base en encuestas de opinión o entrevistas describiendo su impacto social, especialmente en áreas relacionadas con la ingeniería, deberán incluir la metodología y aspectos estadísticos tanto para su diseño como para el análisis de las mediciones y resultados, así como la validación de las correlaciones que pudieran presentarse.

No se consideran para publicación protocolos de investigación, proyectos, propuestas o trabajos de carácter especulativo.

Los artículos a publicarse en partes, deben enviarse al mismo tiempo, pues se arbitrarán juntas.

LINEAMIENTOS EDITORIALES

Es requisito enviar para su consideración editorial: artículo, material gráfico, fichas biográficas de cada autor con un máximo de 100 palabras, en formato electrónico .doc en Word, por *e-mail* a la dirección:

revistaingenierias@uanl.mx

El título del artículo no debe exceder de 80 caracteres. El número máximo de autores por artículo es cinco. La extensión de los artículos no deberá exceder de 15 páginas tamaño carta (incluyendo gráficas y fotos) en tipografía Times New Roman de 11 puntos a espacio sencillo.

Los artículos deben incluir un resumen tanto en español como en inglés, de no más de 100 palabras, así como un máximo de 5 palabras clave tanto en español como en inglés. Las referencias deberán ir numeradas en el orden citado en el texto.

Las fichas bibliográficas incluirán, en orden, los siguientes datos: Autores o editores, título del artículo, nombre del libro o de la revista, lugar, empresa editorial, año de publicación, volumen y número de páginas.

Debe incluirse al menos una imagen o gráfica por página, con resolución de al menos: 300 dpi y 15 cm en su lado más pequeño. Las imágenes además de estar incluidas en el artículo, deben enviarse en archivos individuales en formato .tif, .eps o .jpg

CONTACTO

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León,
Edificio 7, primer piso, ala norte.

Tel.: 8329-4000 Ext. 5854

E-mail: revistaingenierias@uanl.mx

Autores

Los autores deben presentar una narración concisa y exacta del trabajo desarrollado, así como una discusión objetiva de su significado intelectual y científico.

Los autores deben abstenerse de ofrecer manuscritos que se encuentren en consideración por otras publicaciones.

Los autores deben incluir en su manuscrito detalles suficientes y referencias a fuentes de información públicas para hacer posible la reproducción del trabajo por terceros.

Los autores deben abstenerse de presentar críticas personales en sus trabajos.

Los autores deben citar aquellas publicaciones que son antecedentes esenciales para comprender el trabajo.

Los autores deben abstenerse de incluir información que hayan obtenido mediante comunicación privada que no se localice en publicaciones.

Los autores deben abstenerse de incluir información que hayan obtenido de manera confidencial sin el permiso explícito correspondiente.

Los autores deben abstenerse de incluir información obtenida en el proceso de servicios confidenciales, tales como documentación para concursos o solicitudes de becas.

Los autores deben abstenerse de citar publicaciones que no se relacionen o que sólo se relacionen remotamente con la materia.

Los autores deben abstenerse de incluir como autores a terceros que no cumplan con el criterio de coautoría, el cual consiste en su contribución significativa al desarrollo y preparación del trabajo.

Los autores deben incluir a los coautores fallecidos que cumplan con el criterio de coautoría, asentando la fecha de su muerte.

Los autores deben incluir a los coautores que hayan cambiado de afiliación durante el proceso de preparación y publicación del documento y que cumplieron con el criterio de coautoría, señalando el evento en una nota.

Los autores deben reconocer mediante una nota de agradecimiento el apoyo de las instituciones y organismos que hayan contribuido significativamente al desarrollo del trabajo, así como a colaboradores que hayan contribuido de manera importante, incluyendo a fallecidos o a quienes hayan cambiado de afiliación, pero sin que hayan llegado a cumplir con el criterio de coautoría, si los hubiera.

Los autores deben abstenerse de utilizar nombres ficticios o seudónimos.

Los autores deben responsabilizarse del material que presentan en su manuscrito.

Revisores

Los revisores deben declinar cualquier invitación para evaluar un manuscrito si no se consideran calificados, carecen de tiempo para juzgar o se les presenta algún conflicto de intereses, tal como encontrarse vinculados estrechamente a los autores o al trabajo a evaluar.

Los revisores deben manifestar al editor cualquier conflicto de intereses que detecten.

Los revisores deben considerar un manuscrito enviado para revisión como un documento confidencial.

Los revisores deben abstenerse de expresar críticas personales.

Los revisores deben explicar y apoyar sus juicios de manera suficiente para que el editor, los miembros de cuerpo editorial y los autores comprendan el fundamento de las observaciones.

Los revisores deben abstenerse de utilizar o difundir información, argumentos o interpretaciones no publicadas

contenidas en un manuscrito bajo consideración, excepto con el consentimiento expreso de los autores posteriormente al proceso de evaluación.

Los revisores deben considerar en su revisión posibles errores o fallas de los autores al citar el trabajo relevante de otros.

Los revisores deben informar al editor si encontraran alguna semejanza substancial entre el manuscrito y cualquier otro trabajo.

Los revisores no deberán intentar contactar a los autores, si hubieran inferido su identidad, previamente a haber emitido su fallo.

Editor

El editor debe dar consideración justa e imparcial a todos los manuscritos ofrecidos para su publicación, juzgando cada uno de sus méritos científicos o tecnológicos, sin prejuicios de raza, género, religión, creencia, origen étnico, ciudadanía, filosofía o política de los autores.

El editor debe considerar un manuscrito enviado para revisión como un documento confidencial.

El editor debe abstenerse de expresar crítica personal.

El editor debe explicar y apoyar su juicio final para que los autores comprendan el fundamento de las observaciones.

El editor debe abstenerse de utilizar la información no publicada, argumentos o interpretaciones desplegados en un manuscrito sometido, excepto cuando cuente con el permiso de los autores.

El editor deben abstenerse de desplegar información sobre un manuscrito en proceso de revisión o publicación a ninguna persona fuera de aquellos a los que se les solicite consejo profesional.

El editor debe respetar la independencia intelectual de los autores.

El editor debe procesar los manuscritos con diligencia.

El editor debe ejercer su responsabilidad y la autoridad para aceptar o rechazar un artículo enviado para su publicación.

El editor debe delegar en los miembros del consejo editorial o comité técnico la autoridad para aceptar o rechazar un artículo enviado para su publicación en casos en que se presente conflicto de interés con él.

El editor debe delegar la responsabilidad y autoridad editorial a alguno de los miembros de los consejos editoriales cuando él sea autor o coautor de un manuscrito que se somete a consideración de la revista.

Cuerpo Editorial

(Consejos Editoriales y Comité Técnico)

Los miembros del cuerpo editorial deberán estar dispuestos a otorgar consejo al editor en las situaciones requeridas.

Los miembros del cuerpo editorial deben declinar cualquier invitación para brindar consejo si se les presenta algún conflicto de intereses, tal como encontrarse vinculados estrechamente con los autores o con el trabajo a evaluar.

Los miembros del cuerpo editorial deben manifestar al editor cualquier conflicto de intereses que detecten.

Los miembros del cuerpo editorial deben considerar un manuscrito enviado para revisión como un documento confidencial.

Los miembros del cuerpo editorial deben abstenerse de expresar críticas personales.

Los miembros del cuerpo editorial deben explicar y apoyar sus juicios de manera suficiente para que el editor, los miembros de cuerpo editorial y los autores comprendan el fundamento de las observaciones.

Los miembros del cuerpo editorial deben abstenerse de utilizar la información no publicada, argumentos o interpretaciones desplegados en un manuscrito sometido, excepto cuando se cuente con el permiso de los autores.

Los miembros del cuerpo editorial deben abstenerse de desplegar información sobre un manuscrito en proceso de revisión o publicación a cualquier persona fuera de aquellos que se les solicite consejo profesional.

Los miembros del cuerpo editorial deberán respetar la independencia intelectual de los autores.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIME

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA