

Ingenierías

ISSN 1405-0676

93



JULIO - DICIEMBRE 2022, Volumen 25, No. 93

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

- 3 Realización electrónica de sistemas caóticos:
Parte 2, analógicos cuadráticos**
Francisco Antonio Rodríguez Cruz, César de Jesús Chacón Rendón,
Angel Rodríguez-Liñan
- 23 Algoritmo de encriptado empleando sistemas
caóticos de orden no entero en imágenes médicas**
Cornelio Posadas-Castillo, Ernesto Zambrano-Serrano,
Miguel Angel Platas-Garza, Pedro Javier García-Ramírez,
José Ramón Rodríguez-Cruz
- 34 Weibull strength distribution and reliability S-N
percentiles for tensile tests**
Manuel Baro Tijerina, Manuel Piña Monarrez
- 51 Modelo de transferencia de calor para concentradores
solares con flujo bifásico**
Ricardo Isaac Cázares-Ramírez, Sergio Quezada-García,
Marco Antonio Polo-Labarrios, Heriberto Sánchez-Mora
- 64 Niveles sonoros en casa habitación en la ZMM-Mx
durante la primera fase de COVID-19 en 2020**
Fernando Javier Elizondo Garza
- 77 Colaboradores**
- 79 Información para colaboradores**
- 80 Código de ética**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIME

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



Ingenierías

Ingenierías, Volumen 25, N° 93, julio-diciembre 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: 30 de julio 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 2022
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. José Javier Villarreal Tostado
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
Gloria 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.

Realización electrónica de sistemas caóticos:

Parte 2, Analógicos lineales por tramos

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

En la primera parte, se mostró la realización electrónica con circuitos analógicos de algunos sistemas caóticos continuos cuadráticos. En esta segunda parte, se resume la realización electrónica de algunos sistemas caóticos lineales por tramos, mediante circuitos con amplificadores operacionales y diodos. Se demuestra la equivalencia de sus variables y componentes electrónicos con las variables y parámetros normalizados de los modelos matemáticos caóticos. Además, se ilustran resultados del comportamiento caótico de cada circuito comparado con simulaciones de sus modelos matemáticos establecidos. En la siguiente parte de este trabajo, se mostrará la implementación de sistemas caóticos en dispositivos digitales.

PALABRAS CLAVE

Sistemas caóticos, computación analógica, amplificadores operacionales, funciones lineales por tramos.

ABSTRACT

In the first part, the electronic realization with analog circuits of some continuous quadratic chaotic systems was shown. In this second part, the electronic realization of some piecewise linear chaotic systems is summarized, by means of circuits with operational amplifiers and diodes. The equivalence of its variables and electronic components with the normalized variables and parameters of chaotic mathematical models is demonstrated. In addition, results of the chaotic behavior of each circuit are illustrated compared to simulations of their established mathematical models. In the next part of this work, the implementation of chaotic systems in digital devices will be shown.

KEYWORDS

Chaotic systems, analog computation, operational amplifiers, piecewise linear functions.

INTRODUCCIÓN

En la primera parte de este trabajo, se abordó la implementación o realización de sistemas caóticos con no linealidades cuadráticas mediante circuitería analógica con multiplicadores y amplificadores operacionales (op-amp, por sus siglas en inglés). Sin embargo, también existen sistemas lineales por tramos que exhiben comportamiento caótico, que pueden ser implementados electrónicamente, sin requerir multiplicadores.

Tal es el caso del circuito electrónico de Chua, que es uno de los primeros y más conocidos, creado en 1984¹, consta de resistencias, dos capacitores, una bobina y dos op-amp. Puede ser modelado a través de un sistema de tres ecuaciones diferenciales de las tensiones en los capacitores y la intensidad de la corriente eléctrica en la bobina. Lo que caracteriza a este circuito es su autonomía, al ser alimentado sólo por fuentes de corriente directa; y el uso de un único elemento no lineal: la resistencia negativa o diodo de Chua, que brinda una función lineal a tres tramos¹⁻³.

Existen sistemas no lineales, cuyos atractores pueden ser generados con sistemas lineales por tramos, como el sistema afín a Rössler^{4,5}, donde sustituye el elemento no lineal por uno lineal a tramos que produce el mismo atractor. Otra familia de sistemas caóticos bien conocida es la de Sprott⁶, cuyas realizaciones electrónicas utilizan arreglos con diodos y op-amp como elementos lineales por tramos.

En caso de dichas realizaciones electrónicas, es conveniente conocer los modelos matemáticos de los circuitos y la relación o equivalencia de sus variables eléctricas con las ecuaciones diferenciales de los sistemas caóticos, para poder hacer análisis, aplicaciones y control de sus patrones de oscilación basados en su dinámica.

A continuación, se explica la realización de algunos sistemas caóticos mediante circuitos analógicos lineales por tramos, incluyendo el mapeo entre magnitudes de los componentes electrónicos y las variables normalizadas de los modelos caóticos. Posteriormente, se ilustra la comparación de los atractores caóticos mediante simulaciones numéricas e implementación de circuitos. En la tercera parte de este trabajo, se mostrará la implementación de sistemas caóticos en dispositivos digitales.

REALIZACIÓN CON CIRCUITOS ANALÓGICOS

En esta sección, se resume la realización electrónica de algunos sistemas caóticos utilizando resistores, capacitores, diodos y op-amp en las configuraciones conocidas como amplificador inversor, amplificador no inversor, sumador inversor, restador inversor e integrador⁷. También se presenta el mapeo entre las magnitudes eléctricas de dichos componentes y las variables de sus modelos caóticos adimensionales.

Circuito afín al sistema Rössler

El sistema caótico Rössler adimensional puede representarse por el modelo lineal a tramos⁸ descrito por

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = -\alpha x_1 - \beta x_2 - \lambda x_3 \\ \frac{dx_2}{d\tau} = x_1 + \gamma x_2 \\ \frac{dx_3}{d\tau} = -\eta(x_1) - x_3 \end{cases} \quad (1)$$

con

$$\eta(x_1) = \begin{cases} 0, & x_1 \leq 3 \\ -\mu(x_1 - 3), & x_1 > 3 \end{cases} \quad (2)$$

donde x_1 , x_2 y x_3 son las variables de estado, τ es una variable normalizada de tiempo, $\alpha, \beta, \lambda, \gamma$ y μ son parámetros constantes. El sistema (1) tiene una realización electrónica por el circuito de la figura 1, donde $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8, R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}, R_{13}$ son resistencias, C_1, C_2 y C_3 son capacitancias, D_1 es un diodo, V_{CC} y V_{DD3} son los voltajes de alimentación de los amplificadores operacionales U1A, U1B, U1C, U1D y U2, $V_{DC} < 0$ es un voltaje constante respecto a tierra, v_1, v_2 y v_3 son los voltajes de salida de los op-amp U2, U1B y U1D, respectivamente.

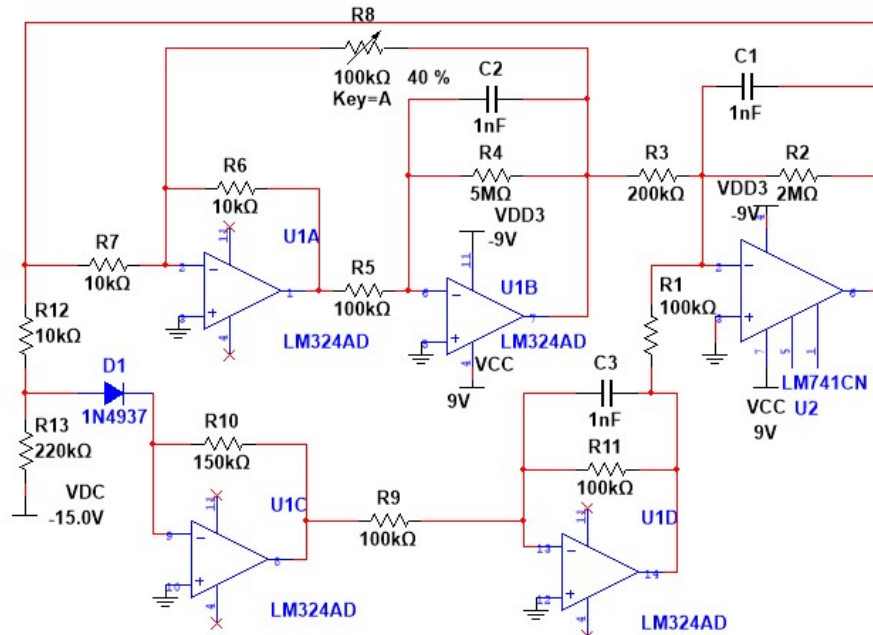


Fig. 1. Diagrama esquemático de la realización del sistema de Rössler lineal por tramos.

Para demostrar la equivalencia del circuito de la figura 1 con el sistema (1) se realiza el siguiente análisis: Se inicia con el op-amp U2, analizando las corrientes en su terminal inversora, se obtiene

$$\begin{aligned} \frac{v_2}{R_3} + \frac{v_3}{R_1} + \frac{v_1}{R_2} + C_1 \frac{dv_1}{dt} &= 0 \\ \frac{dv_1}{dt} &= \frac{1}{C_1} \left(-\frac{v_1}{R_2} - \frac{v_2}{R_3} - \frac{v_3}{R_1} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

donde t es la variable de tiempo. Para el op-amp U1A, la salida de voltaje es

$$V_{1A} = -\frac{R_6}{R_7} v_1 - \frac{R_6}{R_8} v_2$$

Para el op-amp U1B, analizando las corrientes en su terminal inversora se obtiene

$$\begin{aligned} \frac{V_{1A}}{R_5} + \frac{v_2}{R_4} + C_2 \frac{dv_2}{dt} &= 0 \\ C_2 \frac{dv_2}{dt} &= -\frac{V_{1A}}{R_5} - \frac{v_2}{R_4} = \frac{R_6}{R_5 R_7} v_1 + \frac{R_6}{R_5 R_8} v_2 - \frac{1}{R_4} v_2 \\ \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{C_2} \left(\frac{R_6}{R_5 R_7} v_1 + \frac{R_6}{R_5 R_8} v_2 - \frac{1}{R_4} v_2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

En el op-amp U1C, las corrientes en la entrada inversora son

$$i_d + \frac{V_{1C}}{R_{10}} = 0 \quad (5)$$

donde $i_d > 0$ es la corriente a través del diodo $D1$ en polarización directa y V_{1C} es el voltaje de salida del op-amp U1C. La corriente i_d es

$$i_d = \frac{v_1 - V_D}{R_{12}} - \frac{V_D - V_{DC}}{R_{13}} \quad (6)$$

donde V_D es el voltaje de polarización directa del diodo $D1$. Para que $i_d > 0$, es necesario satisfacer $v_1 > \left(V_D + \frac{(V_D - V_{DC})R_{12}}{R_{13}} \right)$, en otro caso $i_d = 0$. Sustituyendo (6) en (5) y despejando el voltaje de salida del op-amp U1C resulta

$$\begin{cases} V_{1C} = 0, & i_d = 0 \\ V_{1C} = R_{10} \left(-\frac{v_1 - V_D}{R_{12}} + \frac{V_D - V_{DC}}{R_{13}} \right) = -\frac{R_{10}}{R_{12}} \left[v_1 - V_D - \frac{(V_D - V_{DC})R_{12}}{R_{13}} \right], & i_d > 0 \end{cases} \quad (7)$$

Para el op-amp U1D, analizando las corrientes en la terminal inversora, se obtiene

$$\begin{aligned} \frac{V_{1C}}{R_9} + \frac{v_3}{R_{11}} + C_3 \frac{dv_3}{dt} &= 0 \\ \frac{dv_3}{dt} &= \frac{1}{C_3} \left[-\frac{V_{1C}}{R_9} - \frac{v_3}{R_{11}} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Por lo tanto, las ecuaciones (3), (4), (8) y (7) pueden describirse como

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{R_5 C_1} \left(-\frac{R_5 v_1}{R_2} - \frac{R_5 v_2}{R_3} - \frac{R_5 v_3}{R_1} \right) \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R_5 C_2} \left(\frac{R_6}{R_7} v_1 + \left(\frac{R_6}{R_8} - \frac{R_5}{R_4} \right) v_2 \right) \\ \frac{dz}{dt} = \frac{1}{R_5 C_3} \left[-\frac{R_5 V_{1C}(v_1)}{R_9} - \frac{R_5 v_3}{R_{11}} \right] \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{con} \quad V_{1C}(v_1) = \begin{cases} 0, & v_1 \leq \left(V_D + \frac{(V_D - V_{DC})R_{12}}{R_{13}} \right) \\ -\frac{R_{10}}{R_{12}} \left(v_1 - \left(V_D + \frac{(V_D - V_{DC})R_{12}}{R_{13}} \right) \right), & v_1 > \left(V_D + \frac{(V_D - V_{DC})R_{12}}{R_{13}} \right) \end{cases} \quad (10)$$

que es un modelo de la implementación electrónica de la figura 1, equivalente al sistema caótico de Rössler descrito por (1)-(2), bajo las condiciones y mapeos del tiempo, estados y parámetros dados por

$$\tau = \frac{1}{R_5 C_1} t, \frac{v_1}{x_1} = \frac{v_2}{x_2} = \frac{v_3}{x_3} = M, M = \frac{(V_D + \frac{(V_D - V_{DC}) R_{12}}{R_{13}})}{3}, \alpha = \frac{R_5}{R_2}, \beta = \frac{R_5}{R_3}, \lambda = \frac{R_5}{R_1}, \gamma = \frac{R_6}{R_8} - \frac{R_5}{R_4}, \mu = \frac{R_{10}}{R_{12}}, C_1 = C_2 = C_3, R_6 = R_7, R_5 = R_9 = R_{11} \text{ y } \eta(x_1) = \frac{V_{1C}(x)}{M}.$$

Circuito de Chua

El sistema caótico Chua¹ está representado en su forma adimensional como

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = \alpha(x_2 - x_1 - \eta(x_1)) \\ \frac{dx_2}{d\tau} = x_1 - x_2 + x_3 \\ \frac{dx_3}{d\tau} = -\beta x_2 - \gamma x_3 \end{cases} \quad (11)$$

con

$$\eta(x_1) = bx_1 + \frac{1}{2}(a-b)(|x_1 + 1| - |x_1 - 1|) = \begin{cases} bx_1 - a + b, & x_1 \leq -1 \\ ax_1, & -1 \leq x_1 \leq 1 \\ bx_1 + a - b, & x_1 \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

donde x_1, x_2 y x_3 son las variables de estado, τ es una variable normalizada de tiempo, α, β, γ, a y b son parámetros constantes. El sistema (11) tiene una realización electrónica por medio del circuito de la figura 2, con el componente denominado diodo Chua (NR), que es una resistencia negativa no lineal implementada por el circuito de la figura 3, donde $R_0, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7$ son resistencias, L_1 es una inductancia, C_1 y C_2 son capacitancias, V_1 y V_2 son los voltajes en los capacitores C_1 y C_2 , respectivamente. i_1, i_2, i_3, i_4 e i_o son corrientes, V_{CC} es el voltaje de alimentación de los amplificadores operacionales U1A y U2A.

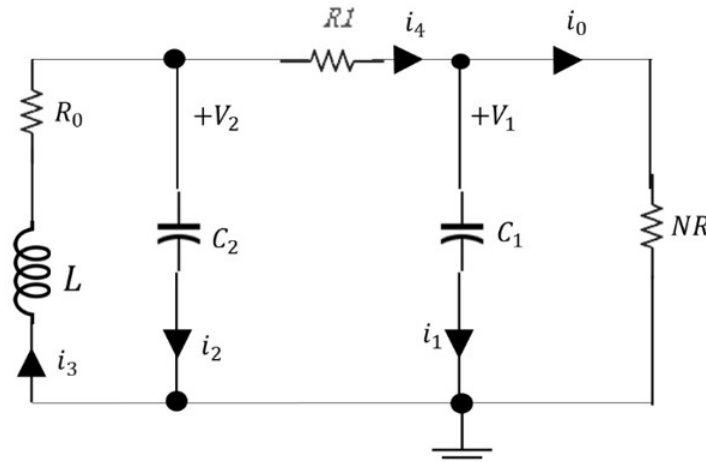


Fig. 2. Diagrama esquemático de la realización del sistema de Chua.

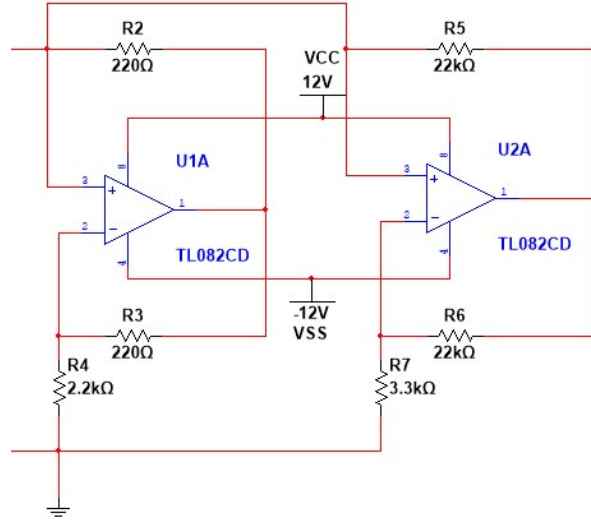


Fig. 3. Diagrama esquemático de la realización del diodo de Chua NR.

Para demostrar la equivalencia del circuito de las figuras 2 y 3 con el sistema (11)-(12) se analiza lo siguiente: La corriente que pasa por el capacitor C_1 es

$$\begin{aligned} i_1 &= i_4 - i_o \\ C_1 \frac{dV_1}{dt} &= \frac{V_2 - V_1}{R_1} - i_o \\ \frac{dV_1}{dt} &= \frac{1}{R_1 C_1} (V_2 - V_1) - \frac{1}{C_1} i_o \end{aligned} \quad (13)$$

La corriente en el capacitor C_2 es

$$\begin{aligned} i_2 &= i_3 - i_4 \\ C_2 \frac{dV_2}{dt} &= i_3 - \frac{V_2 - V_1}{R_1} \\ \frac{dV_2}{dt} &= \frac{1}{R_1 C_2} (V_1 - V_2) + \frac{1}{C_2} i_3 \end{aligned} \quad (14)$$

Puesto que el voltaje V_2 en la rama del capacitor C_2 es el mismo de la rama del inductor, la suma de caídas de tensión en la rama del inductor es

$$\begin{aligned} V_2 &= R_0(-i_3) + L_1 \left(-\frac{di_3}{dt} \right) \\ \frac{di_3}{dt} &= -\frac{V_2}{L_1} - \frac{R_0}{L_1} i_3 \end{aligned} \quad (15)$$

De la figura 3, la corriente a través de R_2 es

$$i_{1A} = \frac{V_1 - V_{1A}}{R_2} = -\frac{V_{1A}}{R_2} + \frac{V_1}{R_2} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} V_1^- &= \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{1A} \\ V_{1A} &= \frac{R_3 + R_4}{R_4} V_1^- \end{aligned} \quad (17)$$

donde V_{1A} es el voltaje de salida y V_1^- el voltaje en la entrada inversora del op-amp U1A. Definiendo

$$\begin{aligned} V_{B1} &\triangleq \max\{|V_1^-|\} = \max\left\{\left|\frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{1A}\right|\right\} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{sat1} \\ V_{B2} &\triangleq \max\{|V_2^-|\} = \max\left\{\left|\frac{R_7}{R_6 + R_7} V_{2A}\right|\right\} = \frac{R_7}{R_6 + R_7} V_{sat2} \end{aligned}$$

donde $V_{sat1} = \max\{|V_{1A}|\} \leq V_{CC}$ y $V_{sat2} = \max\{|V_{2A}|\} \leq V_{CC}$. Entonces, en el caso de $|V_1| \leq V_{B1}$:

$$V_1 = V_1^+ = V_1^-$$

Por lo que, sustituyendo la ecuación (17) en (16), resulta

$$\begin{aligned} i_{1A} &= -\frac{1}{R_2} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_4} \right) V_1^- + \frac{V_1}{R_2} \\ &= -\frac{R_3}{R_2 R_4} V_1 - \frac{V_1}{R_2} + \frac{V_1}{R_2} \\ i_{1A} &= -\frac{R_3}{R_2 R_4} V_1 \end{aligned}$$

Similarmente, para $|V_1| \leq V_{B2}$

$$V_1 = V_2^+ = V_2^- = \frac{R_7}{R_6 + R_7} V_{2A}$$

donde V_{2A} es el voltaje de salida y V_2^- el voltaje en la entrada inversora del op-amp U2A. De la figura 3, la corriente a través de R_5 es

$$\begin{aligned} i_{2A} &= \frac{V_1 - V_{2A}}{R_5} = -\frac{V_{2A}}{R_5} + \frac{V_1}{R_5} \\ i_{2A} &= -\frac{1}{R_5} \left(\frac{R_6 + R_7}{R_7} \right) V_1 + \frac{V_1}{R_5} \\ i_{2A} &= \frac{-R_6}{R_5 R_7} V_1 \end{aligned} \quad (18)$$

En el caso, $V_1 \geq V_{B1}$, entonces

$$V_1 = V_1^+ \geq V_1^- = V_{B1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{sat1}$$

y por lo tanto

$$V_{1A} = V_{sat1} = \frac{R_3 + R_4}{R_4} V_{B1}$$

Sustituyendo en la ecuación (16), resulta que

$$\begin{aligned} i_{1A} &= -\frac{1}{R_2} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_4} \right) V_{B1} + \frac{1}{R_2} V_1 \\ i_{1A} &= -\frac{R_3}{R_2 R_4} V_{B1} - \frac{1}{R_2} V_{B1} + \frac{1}{R_2} V_1 \end{aligned}$$

Similarmente, si $V_1 \geq V_{B2}$, entonces

$$V_1 = V_2^+ \geq V_2^- = V_{B2} = \frac{R_7}{R_6 + R_7} V_{sa}$$

y por lo tanto

$$V_{2A} = V_{sat2} = \frac{R_6 + R_7}{R_7} V_{B2},$$

que sustituyendo en la ecuación (18), resulta en

$$\begin{aligned} i_{2A} &= -\frac{1}{R_5} \left(\frac{R_6 + R_7}{R_7} \right) V_{B2} + \frac{1}{R_5} V_1 \\ i_{2A} &= -\frac{R_6}{R_5 R_7} V_{B2} - \frac{1}{R_5} V_{B2} + \frac{1}{R_5} V_1. \end{aligned}$$

Para el caso $V_1 \leq -V_{B1}$,

$$V_1 = V_1^+ \leq V_1^- = -V_{B1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} (-V_{sat1})$$

y por tanto

$$V_{1A} = -V_{sa} = \frac{R_3 + R_4}{R_4} (-V_{B1}).$$

Sustituyendo en la ecuación (16), resulta que

$$i_{1A} = -\frac{1}{R_2} \left(\frac{R_3 + R_4}{R_4} \right) (-V_{B1}) + \frac{1}{R_2} V_1$$

$$i_{1A} = \frac{R_3}{R_2 R_4} V_{B1} + \frac{1}{R_2} V_{B1} + \frac{1}{R_2} V_1$$

Similarmente, si $V_1 \leq -V_{B2}$, entonces

$$V_1 = V_2^+ \leq V_2^- = -V_{B2} = \frac{R_7}{R_6 + R_7} (-V_{sat2})$$

Por tanto

$$V_{2A} = -V_{sat2} = \frac{R_6 + R_7}{R_7} (-V_{B2})$$

que resulta en

$$i_{2A} = -\frac{1}{R_5} \left(\frac{R_6 + R_7}{R_7} \right) (-V_{B2}) + \frac{1}{R_5} V_1$$

$$i_{2A} = \frac{R_6}{R_5 R_7} V_{B2} + \frac{1}{R_5} V_{B2} + \frac{1}{R_5} V_1$$

Sea $V_{B1} > V_{B2}$. Si $|V_1| \leq V_{B2} < V_{B1}$, entonces

$$i_o = i_{1A} + i_{2A}$$

$$i_o(V_1) = -\frac{R_3}{R_2 R_4} V_1 - \frac{R_6}{R_5 R_7} V_1 = \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} - \frac{R_6}{R_5 R_7} \right) V_1 \quad (19)$$

Si $V_{B2} \leq V_1 \leq V_{B1}$, entonces

$$i_o = i_{1A} + i_{2A} = -\frac{R_3}{R_2 R_4} V_1 + \frac{1}{R_5} V_1 - \frac{R_6}{R_5 R_7} V_{B2} - \frac{1}{R_5} V_{B2}$$

$$= \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} + \frac{1}{R_5} \right) V_1 - \frac{R_6}{R_5 R_7} V_{B2} - \frac{R_3}{R_2 R_4} V_{B2} - \frac{1}{R_5} V_{B2} + \frac{R_3}{R_2 R_4} V_{B2}$$

$$i_o(V_1) = \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} + \frac{1}{R_5} \right) V_1 + \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} - \frac{R_6}{R_5 R_7} \right) V_{B2} - \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} + \frac{1}{R_5} \right) V_{B2} \quad (20)$$

Si $-V_{B1} \leq V_1 \leq -V_{B2}$, entonces

$$i_o = i_{1A} + i_{2A} = -\frac{R_3}{R_2 R_4} V_1 + \frac{1}{R_5} V_1 + \frac{R_6}{R_5 R_7} V_{B2} + \frac{1}{R_5} V_{B2}$$

$$= -\frac{R_3}{R_2 R_4} V_1 + \frac{1}{R_5} V_1 + \frac{R_6}{R_5 R_7} V_{B2} + \frac{R_3}{R_2 R_4} V_{B2} - \frac{R_3}{R_2 R_4} V_{B2} + \frac{1}{R_5} V_{B2}$$

$$i_o(V_1) = \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} + \frac{1}{R_5} \right) V_1 - \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} - \frac{R_6}{R_5 R_7} \right) V_{B2} + \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} + \frac{1}{R_5} \right) V_{B2} \quad (21)$$

Si $V_1 \geq V_{B1} > V_{B2}$, entonces

$$i_o = i_{1A} + i_{2A} = -\frac{R_3}{R_2 R_4} V_{B1} - \frac{1}{R_2} V_{B1} + \frac{1}{R_2} V_1 - \frac{R_6}{R_5 R_7} V_{B2} - \frac{1}{R_5} V_{B2} + \frac{1}{R_5} V_1$$

$$i_o(V_1) = \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} \right) V_1 + \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} - \frac{1}{R_2} \right) V_{B1} + \left(-\frac{R_6}{R_5 R_7} - \frac{1}{R_5} \right) V_{B2}$$

Si $V_1 \leq -V_{B1} < -V_{B2}$, entonces

$$i_o = i_{1A} + i_{2A} = \frac{1}{R_2} V_1 + \frac{R_3}{R_2 R_4} V_{B1} + \frac{1}{R_2} V_{B1} + \frac{1}{R_5} V_1 + \frac{R_6}{R_5 R_7} V_{B2} + \frac{1}{R_5} V_{B2}$$

$$i_o(V_1) = \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} \right) V_1 + \left(\frac{R_3}{R_2 R_4} + \frac{1}{R_2} \right) V_{B1} + \left(\frac{R_6}{R_5 R_7} + \frac{1}{R_5} \right) V_{B2}$$

A partir de (19), (20) y (21), la corriente $i_o(V_1)$ es dada en forma resumida por

$$i_o(V_1) = \begin{cases} m_b V_1 - m_a V_{B2} + m_b V_{B2}, & -V_{B1} \leq V_1 \leq -V_{B2} \\ m_a V_1, & -V_{B2} \leq V_1 \leq V_{B2} \\ m_b V_1 + m_a V_{B2} - m_b V_{B2}, & V_{B2} \leq V_1 \leq V_{B1} \end{cases} \quad (22)$$

donde $m_a = \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} - \frac{R_6}{R_5 R_7}\right)$ y $m_b = \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} + \frac{1}{R_5}\right)$.

Sin embargo, la ecuación (22) puede reescribirse para toda $V_1 \in [-V_{B1}, V_{B1}]$ como la función

$$i_o(V_1) = m_b V_1 + \frac{1}{2}(m_a - m_b)[|V_1 + V_{B2}| - |V_1 - V_{B2}|] \quad (23)$$

Para demostrarlo, considérese que $|x| = \text{signo}(x)x$, donde

$$\text{signo}(x) = \begin{cases} +1, & x > 0 \\ 0, & x = 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

Entonces, para $V_{B2} \leq V_1 \leq V_{B1}$, la ecuación (23) es

$$\begin{aligned} i_o(V_1) &= m_b V_1 + \frac{1}{2}(m_a - m_b)[\text{signo}(V_1 + V_{B2})(V_1 + V_{B2}) - \text{signo}(V_1 - V_{B2})(V_1 - V_{B2})] \\ i_o(V_1) &= m_b V_1 + \frac{1}{2}(m_a - m_b)[(+1)(V_1 + V_{B2}) - (+1)(V_1 - V_{B2})] \\ &= m_b V_1 + \frac{1}{2}(m_a - m_b)[V_1 + V_{B2} - V_1 + V_{B2}] \\ i_o(V_1) &= m_b V_1 + m_a V_{B2} - m_b V_{B2} \end{aligned}$$

que es consistente con la ecuación (22).

Para $-V_{B2} \leq V_1 \leq V_{B2}$, la ecuación (23) es

$$\begin{aligned} i_o(V_1) &= -m_b V_1 + \frac{1}{2}(m_a - m_b)[\text{signo}(V_1 + V_{B2})(V_1 + V_{B2}) - \text{signo}(V_1 - V_{B2})(V_1 - V_{B2})] \\ i_o(V_1) &= m_b V_1 + \frac{1}{2}(m_a - m_b)[(1)(V_1 + V_{B2}) - (-1)(V_1 - V_{B2})] \\ &= m_b V_1 + \frac{1}{2}(m_a - m_b)[V_1 + V_{B2} + V_1 - V_{B2}] \\ &= m_b V_1 + m_a V_1 - m_b V_1 \\ i_o(V_1) &= -m_a V_1 \end{aligned}$$

que es consistente con la ecuación (22).

Para $-V_{B1} \leq V_1 \leq -V_{B2}$, la ecuación (23) es

$$\begin{aligned} i_o(V_1) &= m_b V_1 + \frac{1}{2}(m_a - m_b)[\text{signo}(V_1 + V_{B2})(V_1 + V_{B2}) - \text{signo}(V_1 - V_{B2})(V_1 - V_{B2})] \\ i_o(V_1) &= m_b V_1 + \frac{1}{2}(m_a - m_b)[(-1)(V_1 + V_{B2}) - (-1)(V_1 - V_{B2})] \\ &= m_b V_1 + \frac{1}{2}(m_a - m_b)[-V_1 - V_{B2} + V_1 - V_{B2}] \\ i_o(V_1) &= m_b V_1 - m_a V_{B2} + m_b V_{B2} \end{aligned}$$

que es consistente con la ecuación (22).

Por lo tanto, partiendo de las ecuaciones (13), (14), (15), (22) y (23), el circuito electrónico de las figuras 2 y 3 es modelado por

$$\begin{cases} \frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{R_1 C_2} \frac{C_2}{C_1} (V_2 - V_1 - R_1 i_o(V_1)) \\ \frac{dV_2}{dt} = \frac{1}{R_1 C_2} (V_1 - V_2 + R_1 i_3) \\ \frac{di_3}{dt} = \frac{1}{R_1 C_2} \left(-\frac{R_1 C_2 V_2}{L_1} - \frac{R_0 R_1 C_2}{L_1} i_3 \right) \end{cases} \quad (24)$$

con (23) y (22)

$$i_o(V_1) = m_b V_1 + \frac{1}{2}(m_a - m_b)[|V_1 + V_{B2}| - |V_1 - V_{B2}|] = \begin{cases} m_b V_1 - m_a V_{B2} + m_b V_{B2}, & -V_{B1} \leq V_1 \leq -V_{B2} \\ m_a V_1, & -V_{B2} \leq V_1 \leq V_{B2} \\ m_b V_1 + m_a V_{B2} - m_b V_{B2}, & V_{B2} \leq V_1 \leq V_{B1} \end{cases}$$

El modelo (24)-(23) es equivalente al sistema caótico de Chua adimensional (11)-(12), bajo las condiciones y mapeos del tiempo, estados y parámetros dados por $\tau = \frac{1}{R_1 C_2} t$, $\frac{V_1}{x_1} = \frac{V_2}{x_2} = \frac{R_1 i_3}{x_3} = M$, $M = V_{B2} = \frac{R_7}{R_6 + R_7} V_{CC}$, $V_{B1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{CC}$, $\alpha = \frac{C_2}{C_1}$, $\beta = \frac{R_1^2 C_2}{L_1}$, $\gamma = \frac{R_0 R_1 C_2}{L_1}$, $\eta(x_1) = \frac{R_1 i_o(V_1)}{V_{B2}}$, $a = R_1 m_a$, $b = R_1 m_b$, $m_a = \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} - \frac{R_6}{R_5 R_7}\right)$ y $m_b = \left(-\frac{R_3}{R_2 R_4} + \frac{1}{R_5}\right)$.

Circuitos Sprott

J.C. Sprott reportó⁶ una familia de sistemas caóticos, descrita por

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = x_2 \\ \frac{dx_2}{d\tau} = x_3 \\ \frac{dx_3}{d\tau} = -ax_3 - x_2 + \eta(x_1) \end{cases} \quad (25)$$

donde a es un parámetro constante del sistema caótico y $\eta(x_1)$ es una función lineal a trozos. La ecuación (25) tiene una realización electrónica por el circuito de la figura 4, donde R_1 , R_2 , R_3 son resistencias, C_1 , C_2 y C_3 son capacitancias, V_{CC} y V_{SS} son los voltajes de alimentación de los amplificadores operacionales U1A, U1B, y v es el voltaje del capacitor C_2 , x y z son los voltajes de salida de los op-amp U1B y U1A, respectivamente.

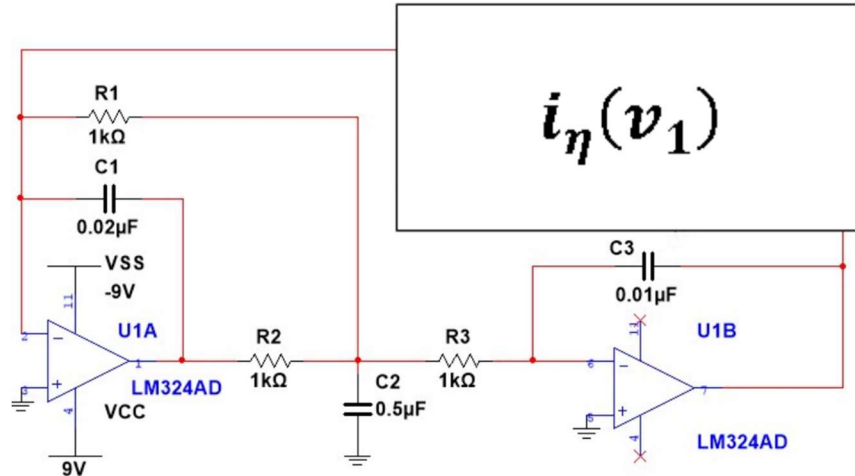


Fig. 4. Diagrama esquemático de la realización de los sistemas de Sprott.

Para demostrar la equivalencia del circuito de la figura 4 con el sistema (25) se realiza el siguiente análisis:

Se inicia con el op-amp U1A, analizando las corrientes en el nodo de entrada inversora:

$$i_\eta(v_1) + \frac{v_2}{R_1} + C_1 \frac{dv_3}{dt} = 0$$

donde v_1 , v_3 y v_2 son los voltajes de salida de los op-amp U1B, U1A y del capacitor C_2 , respectivamente. Despejando, resulta

$$\frac{dv_3}{dt} = -\frac{v_2}{R_1 C_1} - \frac{i_\eta(v_1)}{C_1} \quad (26)$$

Analizando las corrientes en el nodo del capacitor C_2 , se tiene:

$$\frac{v_3 - v_2}{R_2} - \frac{v_2}{R_1} - \frac{v_2}{R_3} - C_2 \frac{dv_2}{dt} = 0$$

Despejando y si $R_1 = R_2 = R_3$, resulta

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{v_3}{R_2 C_2} - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \frac{v_2}{C_2} = \frac{v_3}{R_2 C_2} - \frac{3v_2}{R_2 C_2} \quad (27)$$

El voltaje de salida del op-amp U1B obedece a la relación

$$v_1 = \frac{1}{C_3} \int \left(-\frac{v_2}{R_3} \right) dt \quad (28)$$

Por lo tanto, partiendo de las ecuaciones (28), (27) y (26), si $C_1 = \frac{10a}{3} C_3$ y $C_2 = \frac{30}{a} C_3$, el circuito electrónico de la figura 4 es modelado por

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{R_3 C_3} (-v_2) \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{R_2 C_3} \left(\frac{av_3}{30} - \frac{a}{10} v_2 \right) \\ \frac{dv_3}{dt} = \frac{1}{R_1 C_3} \frac{3}{10a} (-v_2 - R_1 i_\eta(v_1)) \end{cases} \quad (29)$$

El modelo (29) es equivalente al sistema caótico de Sprott adimensional (25), bajo las condiciones y mapeos del tiempo, estados y parámetros dados por $\tau = \frac{1}{10R_3 C_3} t$, $\frac{v_1}{10x_1} = \frac{-v_2}{x_2} = \frac{av_2 - av_3/3}{x_3} = M$, $\frac{R_1 i_\eta(v_1)}{M} = \eta(x_1)$, $R_1 = R_2 = R_3$, $C_1 = \frac{10a}{3} C_3$, $C_2 = \frac{30}{a} C_3$. En esta familia de circuitos, $i_\eta(v_1)$ puede construirse por una gran variedad de funciones, entre ellas las generadas por los cuatro circuitos de la figura 5.

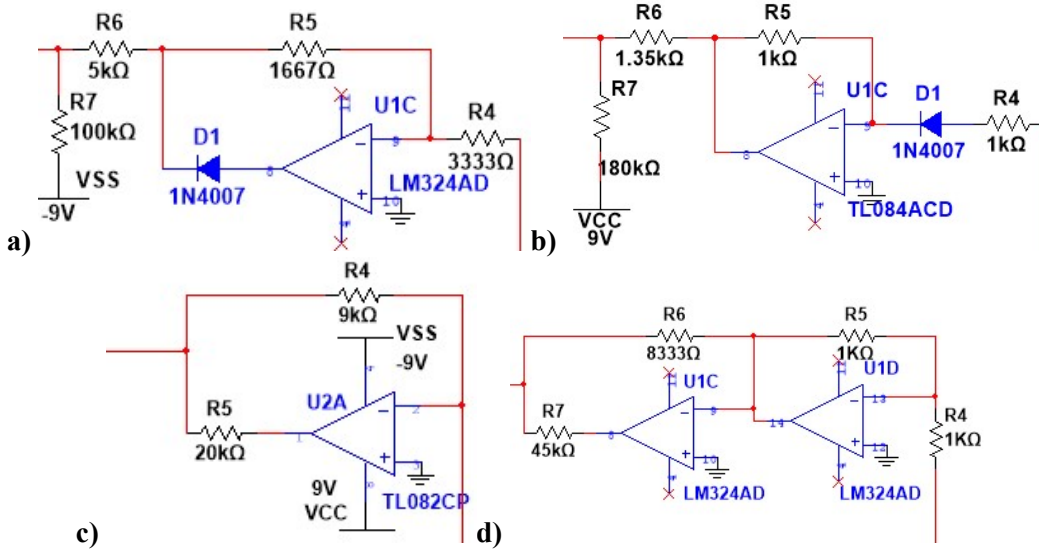


Fig. 5. Circuitos para diferentes funciones de corriente $i_\eta(v_1)$, equivalentes a: **a)** $\eta(x_1) = b|x_1| - c$, **b)** $\eta(x_1) = -b\max(x_1, 0) + c$, **c)** $\eta(x_1) = bx_1 - c\text{signo}(x_1)$, **d)** $\eta(x_1) = -bx_1 + c\text{signo}(x_1)$.

En el circuito de la figura 5.a, se obtiene $i_\eta(v_1)$ de la suma de corrientes de la fuente y del op-amp U1C, en el nodo que está conectado a la terminal de entrada inversora del op-amp U1A, cuyo voltaje es cero:

$$i_\eta(v_1) = \frac{V_{SS}}{R_7} + i_{1C}$$

Para calcular la corriente i_{1C} que pasa por la resistencia R_6 , debe considerarse que si $v_1 > 0$, el voltaje de salida del op-amp U1C es $V_{1C} < 0$, el diodo estará polarizado inversamente y el op-amp U1C estará aislado del circuito. Así, la corriente i_{1C} fluye a través de las 3 resistencias en serie:

$$i_{1C} = \frac{v_1}{R_4 + R_5 + R_6}$$

Por lo que,

$$i_\eta(v_1) = \frac{1}{R_4 + R_5 + R_6} v_1 + \frac{V_{SS}}{R_7} = \frac{1}{R_4 + R_5 + R_6} \text{signo}(v_1)|v_1| + \frac{V_{SS}}{R_7} = \frac{1}{R_4 + R_5 + R_6} |v_1| + \frac{V_{SS}}{R_7}$$

Cuando $v_1 < 0$, el voltaje de salida del op-amp U1C es $V_{1C} > 0$, el diodo se polariza directamente, haciendo que

$$V_{1C} = -\frac{R_5}{R_4} v_1$$

La corriente resulta en

$$i_{1C} = \frac{V_{1C}}{R_6} = -\frac{R_5}{R_6 R_4} v_1$$

Por lo que,

$$i_\eta(v_1) = -\frac{R_5}{R_6 R_4} v_1 + \frac{V_{SS}}{R_7} = -\frac{R_5}{R_6 R_4} \text{signo}(v_1)|v_1| + \frac{V_{SS}}{R_7} = \frac{R_5}{R_6 R_4} |v_1| + \frac{V_{SS}}{R_7} \quad (30)$$

Si se elige $R_4 = \frac{10R_1}{3b}$, $R_5 = \frac{10R_1}{6b}$, $R_6 = \frac{10R_1}{2b}$ y $V_{SS} = -\frac{Mc}{R_1}$, donde b y c son constantes, entonces $\frac{1}{R_4 + R_5 + R_6} =$

$$\frac{R_5}{R_6 R_4} = \frac{b}{10} \text{ y}$$

$$i_\eta(v_1) = \frac{b}{10R_1} |v_1| - \frac{Mc}{R_1}$$

que equivale a

$$\eta(x_1) = \frac{R_1 i_\eta(v_1)}{M} = b|x_1| - c \quad (31)$$

Para el circuito de la figura 5.b, utilizando el mismo principio, se obtiene la corriente:

$$i_\eta(v_1) = \frac{V_{CC}}{R_7} + i_{1C}$$

Cuando $v_1 \leq 0$, la corriente proveniente del op-amp U1C será $i_{1C} = 0$ puesto que el diodo estará polarizado inversamente, no conduce y el voltaje de salida del op-amp es $V_{1C} = 0$. Si $v_1 > 0$, entonces

$$V_{1C} = -\frac{R_5}{R_4} v_1$$

La corriente resulta en

$$i_{1C} = \frac{V_{1C}}{R_6} = -\frac{R_5}{R_6 R_4} v_1$$

Por lo que,

$$i_\eta(v_1) = -\frac{R_5}{R_6 R_4} v_1 + \frac{V_{CC}}{R_7} \quad (32)$$

Si se elige $R_4 = R_5$, $R_6 = \frac{10R_1}{b}$ y $R_7 = \frac{V_{CC}}{Mc} R_1$, donde b y c son constantes, entonces $\forall v_1$:

$$i_\eta(v_1) = -\frac{b}{10R_1} \max(v_1, 0) + \frac{Mc}{R_1}$$

que equivale a

$$\eta(x_1) = \frac{R_1 i_\eta(v_1)}{M} = -b \max(x_1, 0) + c \quad (33)$$

Para el circuito de la figura 5.c, se obtiene $i_\eta(v_1)$ de la suma de corrientes de las dos ramas, esto es:

$$i_\eta(v_1) = \frac{v_1}{R_4} + i_{1C}$$

donde la corriente i_{1C} depende del voltaje de salida del op-amp U2A como comparador. En esta configuración, la salida será $V_{1C} = V_{CC}$ si $v_1 < 0$, $V_{1C} = -V_{SS}$ si $v_1 > 0$ y $V_{1C} = 0$ si $v_1 = 0$. Si $|V_{CC}| = |V_{SS}|$, el voltaje de salida del op-amp U2A puede describirse como $V_{1C} = -V_{CC} \text{signo}(v_1)$. Por lo tanto,

$$i_{1C} = -\frac{V_{CC} \text{signo}(v_1)}{R_5}$$

Por lo que,

$$i_\eta(v_1) = \frac{v_1}{R_4} - \frac{V_{CC} \text{signo}(v_1)}{R_5} \quad (34)$$

Si se elige $R_4 = \frac{10R_1}{b}$ y $R_5 = \frac{V_{CC}}{Mc} R_1$, donde b y c son constantes, entonces

$$i_\eta(v_1) = \frac{b}{10R_1} v_1 - \frac{Mc}{R_1} \text{signo}(v_1)$$

que equivale a

$$\eta(x_1) = \frac{R_1 i_\eta(v_1)}{M} = bx_1 - c \text{signo}(x_1) \quad (35)$$

El circuito de la figura 5.d, se analiza igual que el c), pero se añade un op-amp U1D inversor con ganancia unitaria si $R_4 = R_5$. Si se elige $R_6 = \frac{10R_1}{b}$ y $R_7 = \frac{V_{CC}}{Mc} R_1$, donde b y c son constantes, se deduce fácilmente que

$$i_\eta(v_1) = -\frac{b}{10R_1} v_1 + \frac{Mc}{R_1} \text{signo}(v_1) \quad (36)$$

que equivale a

$$\eta(x_1) = \frac{R_1 i_\eta(v_1)}{M} = -bx_1 + c \text{signo}(x_1) \quad (37)$$

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 con términos lineales por tramos Rössler afín, Chua y Sprott, 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 afín a Rössler de la figura 1 se utilizaron op-amp LM324 y LM741, se consideraron parámetros $R_1 = R_5 = R_9 = R_{11} = 100 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 2 \text{ M}\Omega$, $R_3 = 200 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 5 \text{ M}\Omega$, $R_6 = R_7 = R_{12} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_8 = 40 \text{ k}\Omega$, $R_{10} = 150 \text{ k}\Omega$, $R_{13} = 220 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = C_3 = 1 \text{ nF}$, $V_D = 0.7 \text{ V}$, $V_{CC} = 9 \text{ V}$, $V_{DD} = -9 \text{ V}$, $V_{DC} = -15 \text{ V}$; que corresponden a los valores $\alpha = 0.05$, $\beta = 0.5$, $\lambda = 1$, $\gamma = 0.23$, $\mu = 15$ del modelo adimensional (1)-(2), con $M=0.4712$ y $\tau = 10,000t$.

Para la instrumentación electrónica del circuito analógico de Chua de las figuras 2 y 3 se usaron op-amps TL082 y se consideraron los parámetros $L_1 = 18 \text{ mH}$, $C_1 = 10 \text{ nF}$, $C_2 = 100 \text{ nF}$, $R_o = 8.2 \text{ }\Omega$, $R_1 = 1.8 \text{ k}\Omega$, $R_2 = R_3 = 220 \text{ }\Omega$, $R_4 = 2.2 \text{ k}\Omega$, $R_5 = R_6 = 22 \text{ k}\Omega$, $R_7 = 3.3 \text{ k}\Omega$, $V_{CC} = 12 \text{ V} \approx V_{sat1} \approx V_{sat2}$, $V_{B1} = 10.9091 \text{ V}$, $V_{B2} = a = -1.3636$, $b = -0.7364$, $\alpha = 10$, $\beta = 18$ y $\gamma = 0.082$ del modelo adimensional (11)-(12), con $M = 1.5652$ y $\tau = 5,555.55t$.

Para la instrumentación electrónica de los circuitos de Sprott de las figuras 4 y 5 se utilizaron op-amps LM324, con excepción de los circuitos de las figuras 5.b y 5.c, donde se usaron op-amps TL084 y TL082, respectivamente. Se consideraron los parámetros $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 0.02 \text{ }\mu\text{F}$, $C_2 = 0.5 \text{ }\mu\text{F}$, $C_3 = 0.01 \text{ }\mu\text{F}$; que corresponden al valor $a = 0.6$ del modelo adimensional (25) con $M=0.1$ y $\tau = 10,000t$.

Para el circuito de la figura 5.a: $V_{SS} = -9\text{V}$, $R_4 = 3.333 \text{ k}\Omega$, $R_5 = 1.667 \text{ k}\Omega$, $R_6 = 5 \text{ k}\Omega$ y $R_7 = 100 \text{ k}\Omega$, que corresponden a los valores $b = 1$ y $c = 0.9$ de la función adimensional $\eta(x_1) = b|x_1| - c$. Para el circuito de la figura 5.b: $V_{CC} = 9\text{V}$, $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_5 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_6 = 1.35 \text{ k}\Omega$ y $R_7 = 180 \text{ k}\Omega$, que corresponden a los valores $b = 7.4$ y $c = 0.5$ de la función adimensional $\eta(x_1) = -b\max(x_1, 0) + c$. Para el circuito de la figura 5.c: $V_{CC} = 9\text{V}$,

$V_{SS} = -9V$, $R_4 = 9\text{ k}\Omega$ y $R_5 = 20\text{ k}\Omega$, que corresponden a los valores $b = 1.11$ y $c = 4.5$ de la función adimensional $\eta(x_1) = bx_1 - c\text{signo}(x_1)$. Para el circuito de la figura 5.d: $V_{CC} = 9V$, $V_{SS} = -9V$, $R_4 = R_5 = 1\text{ k}\Omega$, $R_6 = 8.333\text{ k}\Omega$ y $R_7 = 45\text{ k}\Omega$, que corresponden a los valores $b = 1.2$ y $c = 2$ de la función adimensional $\eta(x_1) = -bx_1 + c\text{signo}(x_1)$.

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 afín a Rössler

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 (9)-(10), obtenido para ese circuito. En la figura 8, se muestra el atractor del modelo (9)-(10) mapeado a la escala equivalente del sistema adimensional (1)-(2). En la figura 9, se muestra el atractor del sistema adimensional (1)-(2) mediante Scilab.

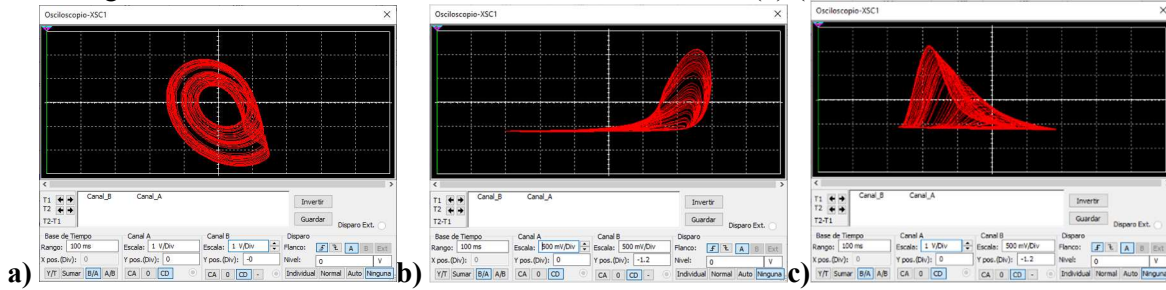


Fig. 6. Atractor afín a Rössler del circuito de la figura 1, en planos v_1 - v_2 (a), v_1 - v_3 (b) y v_2 - v_3 (c).

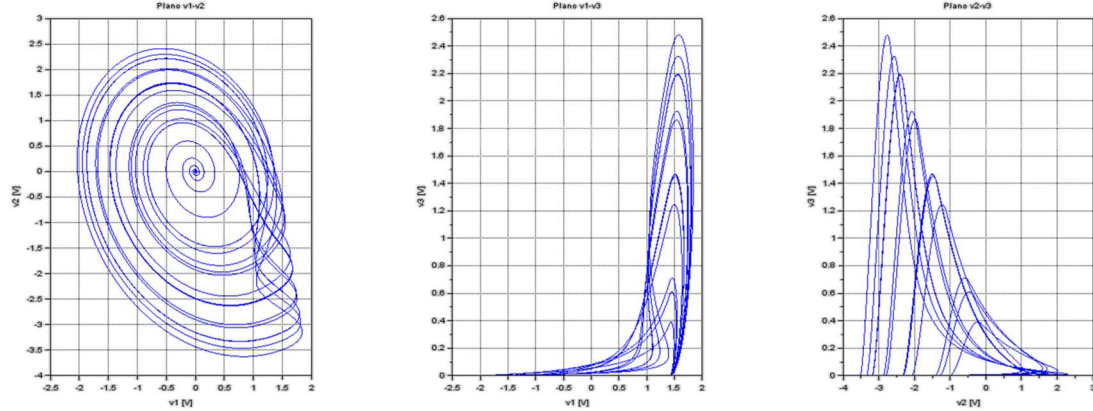


Fig. 7. Atractor afín a Rössler del modelo (9)-(10) del circuito, en planos v_1 - v_2 , v_1 - v_3 y v_2 - v_3 .

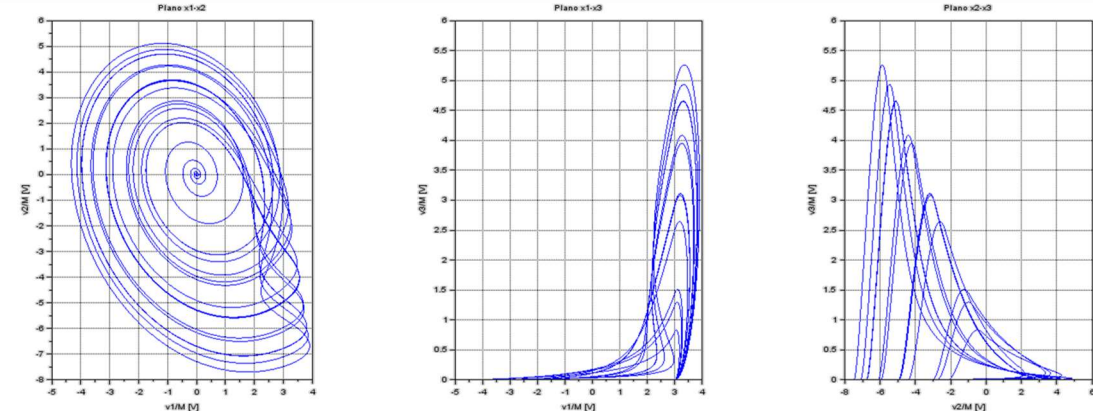


Fig. 8. Atractor afín a Rössler del modelo (9)-(10) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

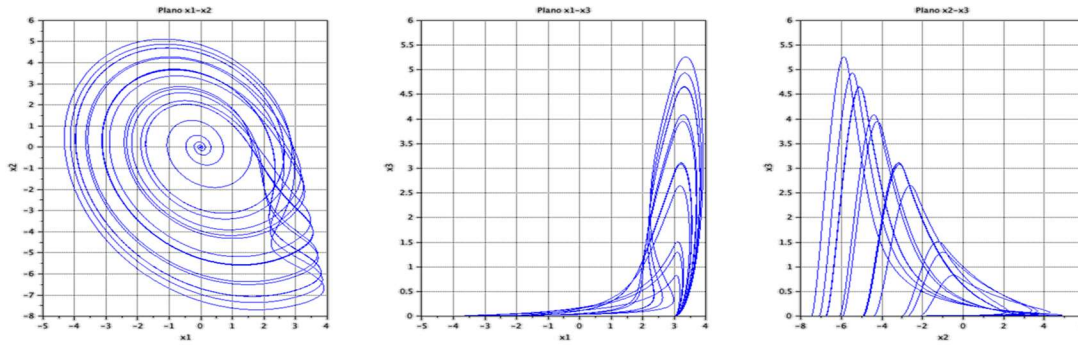


Fig. 9. Atractor afín a Rössler del modelo adimensional (1)-(2), en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

Sistema de Chua

En la figura 10, se muestran los voltajes del circuito de las figuras 2 y 3 en proyecciones planares de su atractor con Multisim. En la figura 11, se muestra el atractor del modelo (24)-(23), obtenido para ese circuito. En la figura 12, se muestra el atractor del modelo (24)-(23) mapeado a la escala equivalente del sistema adimensional (11)-(12). En la figura 13, se muestra el atractor del sistema adimensional (11)-(12) mediante Scilab.

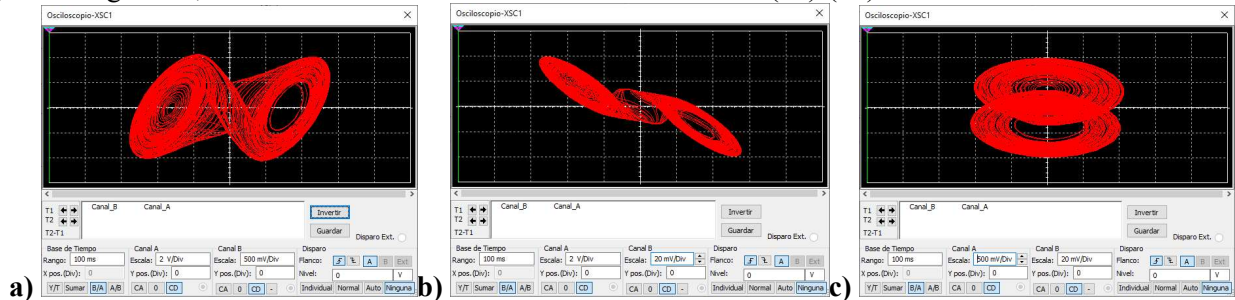


Fig. 10. Atractor de Chua del circuito de las figuras 2 y 3, en planos v_1 - v_2 (a), v_1 - $R0i_3$ (b) y v_2 - $R0i_3$ (c).

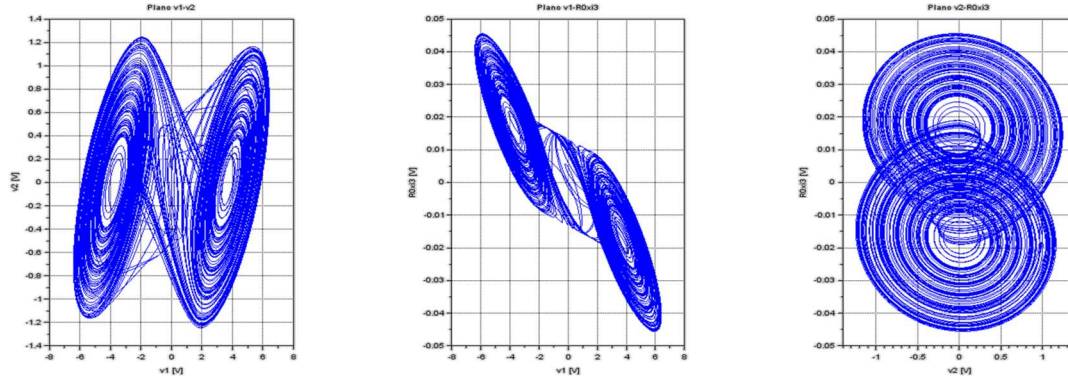


Fig. 11. Atractor de Chua del modelo (24)-(23) del circuito, en planos v_1 - v_2 , v_1 - $R0i_3$ y v_2 - $R0i_3$.

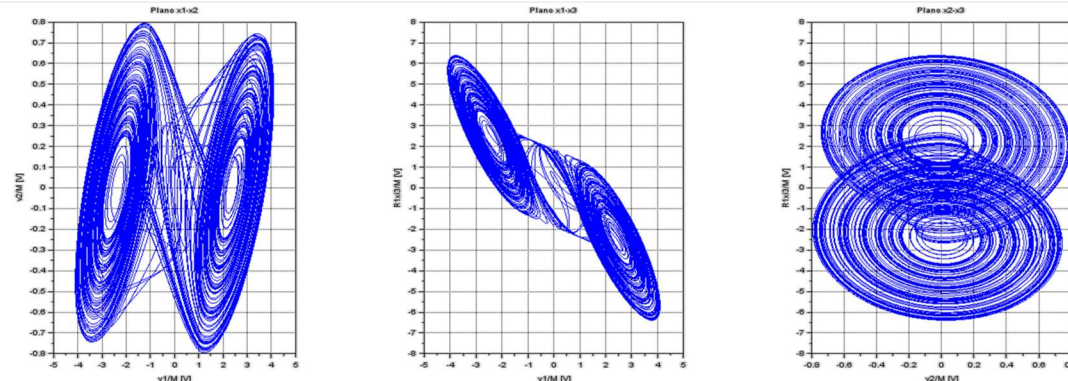


Fig. 12. Atractor de Chua del modelo (24)-(23) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

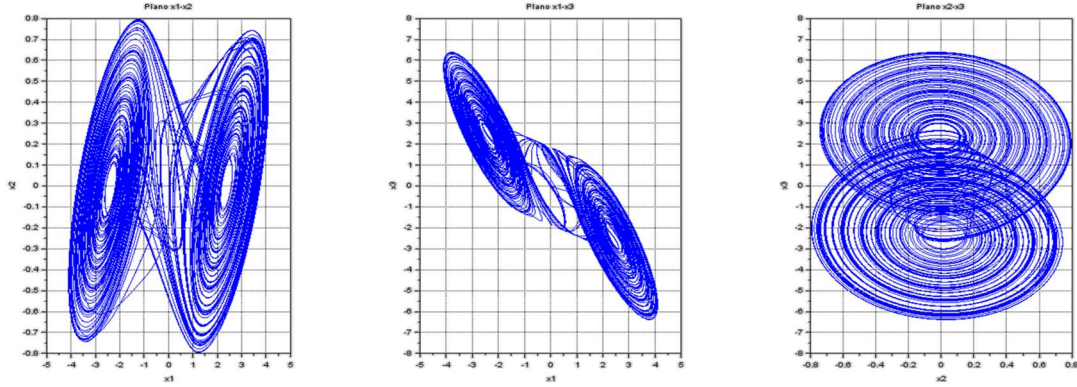


Fig. 13. Atractor de Chua del modelo adimensional (11)-(12), en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

Sistemas Sprott

En la figura 14, se muestran los voltajes del circuito analógico de las figuras 4 y 5.a en proyecciones planares de su atractor con Multisim. En la figura 15, se muestra el atractor del modelo (29) y (30), obtenido para ese circuito. En la figura 16, se muestra el atractor del modelo (29) y (30) mapeado a la escala equivalente del sistema (25) y (31). En la figura 17, se muestra el atractor del sistema adimensional (25) y (31) mediante Scilab.

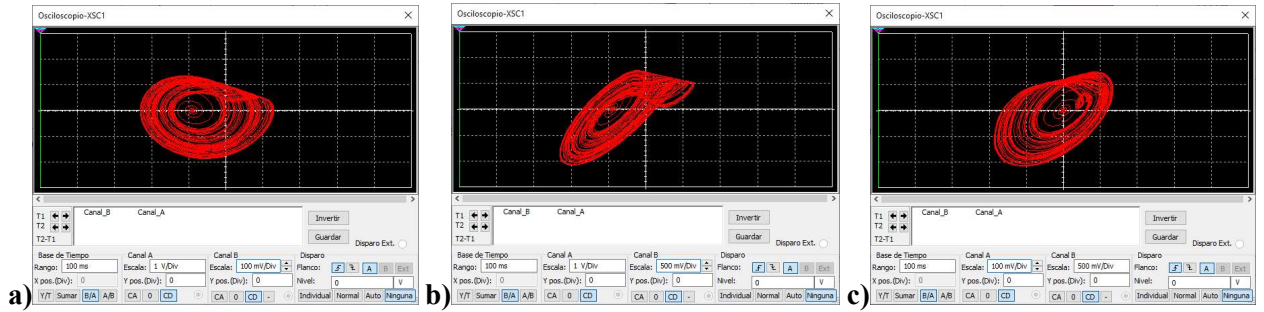


Fig. 14. Atractor de Sprott del circuito de las figuras 4 y 5.a, en planos v_1 - v_2 (a), v_1 - v_3 (b) y v_2 - v_3 (c).

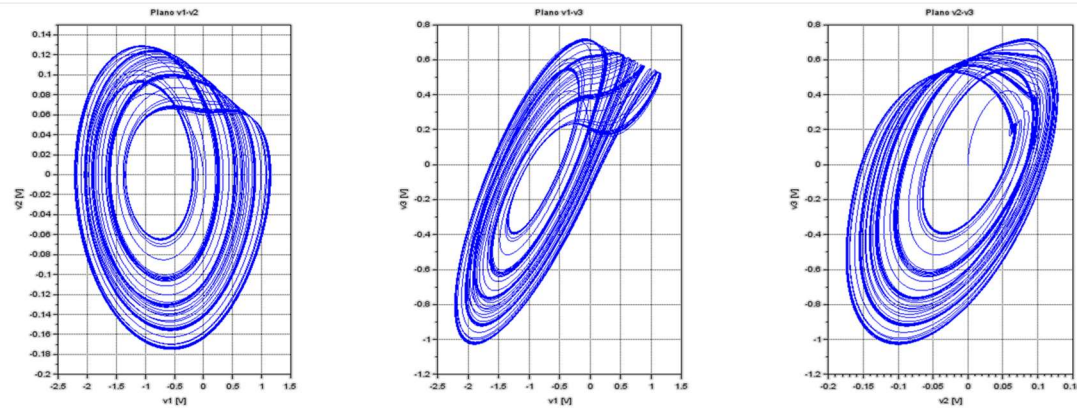


Fig. 15. Atractor de Sprott del modelo (29) con (30) del circuito, en planos v_1 - v_2 , v_1 - v_3 y v_2 - v_3 .

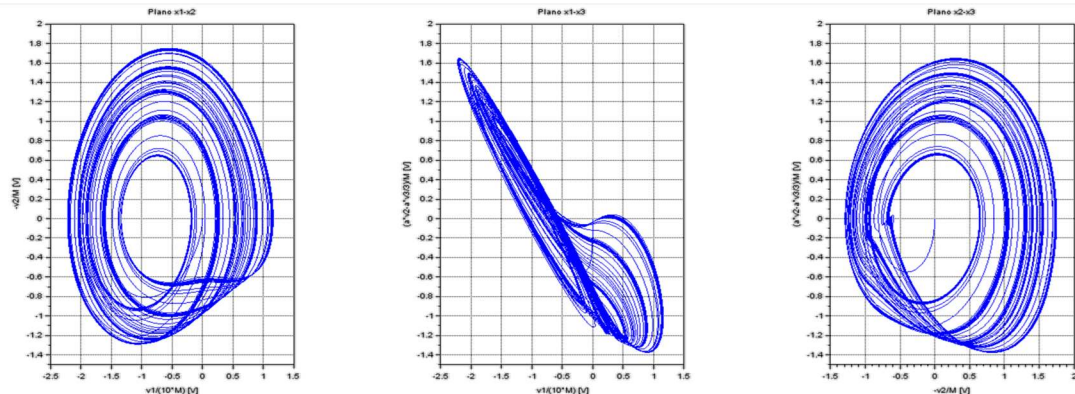


Fig. 16. Atractor de Sprott del modelo (29) con (30) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

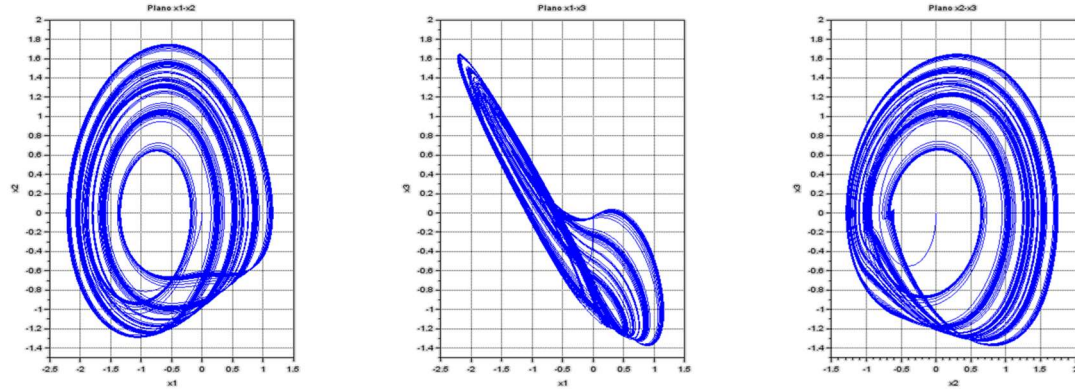


Fig. 17. Atractor de Sprott del modelo adimensional (25) con (31), en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

En la figura 18, se muestran los voltajes del circuito analógico de las figuras 4 y 5.b en proyecciones planares de su atractor con Multisim. En la figura 19, se muestra el atractor del modelo (29) y (32), obtenido para ese circuito. En la figura 20, se muestra el atractor del modelo (29) y (32) mapeado a la escala equivalente del sistema (25) y (33). En la figura 21, se muestra el atractor del sistema adimensional (25) y (33) mediante Scilab.

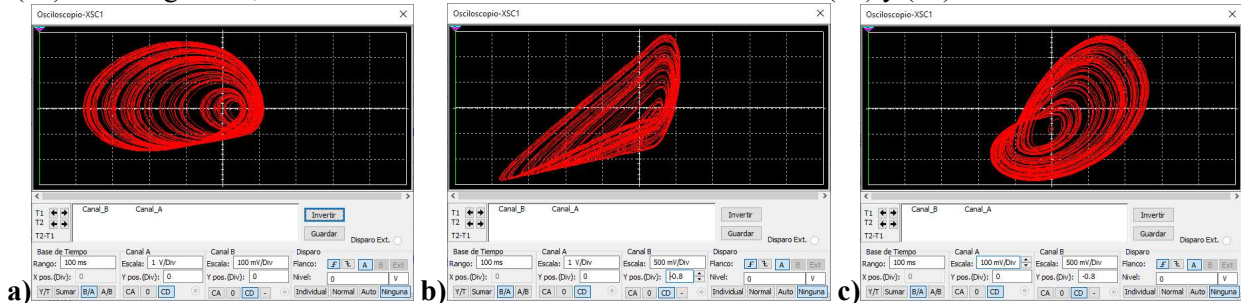


Fig. 18. Atractor de Sprott del circuito de las figuras 4 y 5.b, en planos v_1-v_2 (a), v_1-v_3 (b) y v_2-v_3 (c).

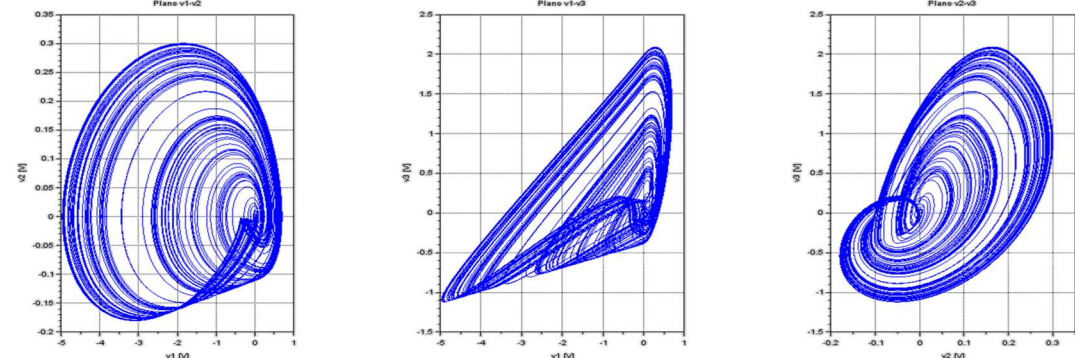


Fig. 19. Atractor de Sprott del modelo (29) con (32) del circuito, en planos v_1-v_2 , v_1-v_3 y v_2-v_3 .

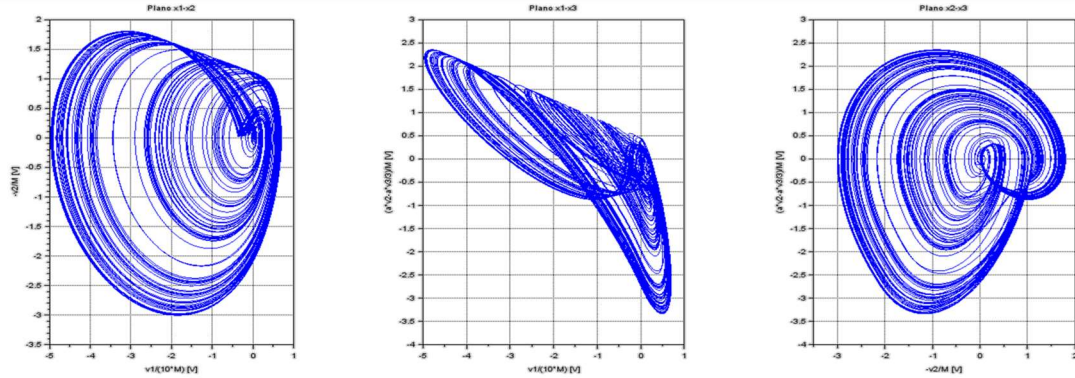


Fig. 20. Atractor de Sprott del modelo (29) con (32) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

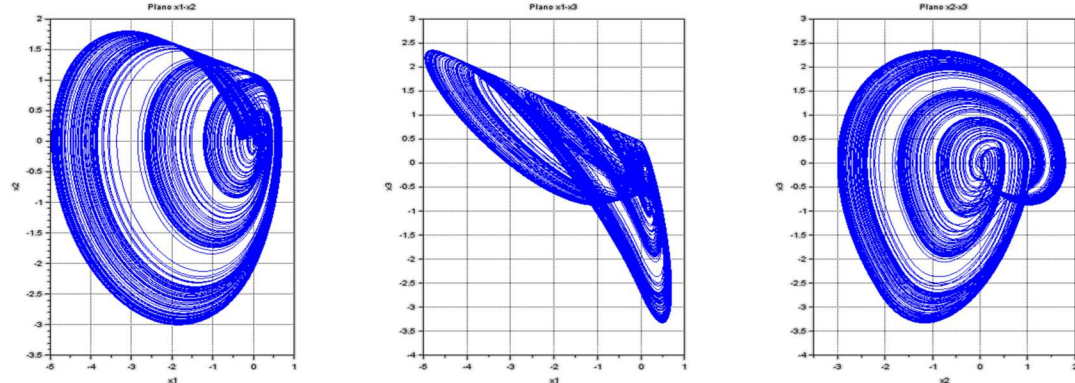


Fig. 21. Atractor de Sprott del modelo adimensional (25) con (33), en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

En la figura 22, se muestran los voltajes del circuito analógico de las figuras 4 y 5.c en proyecciones planares de su atractor con Multisim. En la figura 23, se muestra el atractor del modelo (29) y (34), obtenido para ese circuito. En la figura 24, se muestra el atractor del modelo (29) y (34) mapeado a la escala equivalente del sistema (25) y (35). En la figura 25, se muestra el atractor del sistema adimensional (25) y (35) mediante Scilab.

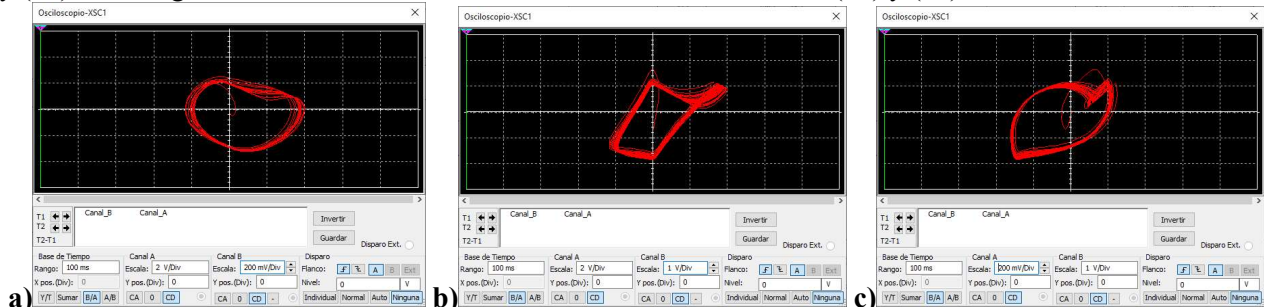


Fig. 22. Atractor de Sprott del circuito de las figuras 4 y 5.c, en planos v_1-v_2 (a), v_1-v_3 (b) y v_2-v_3 (c).

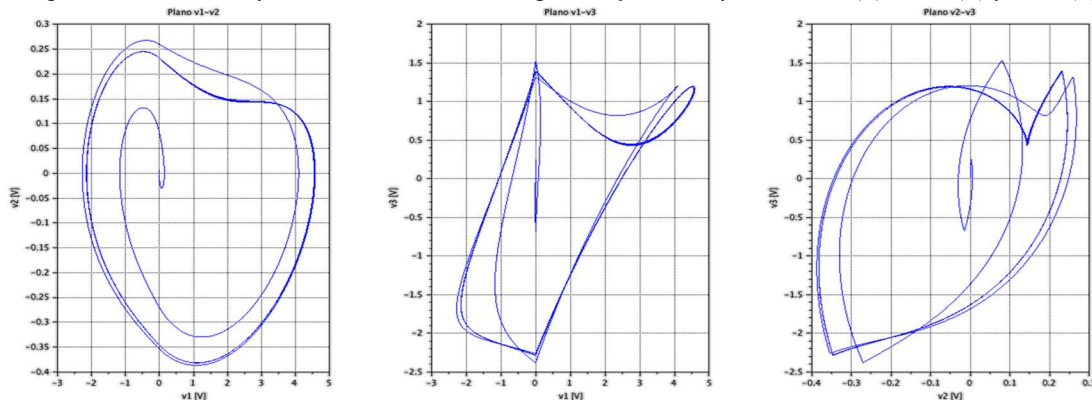


Fig. 23. Atractor de Sprott del modelo (29) con (34) del circuito, en planos v_1-v_2 , v_1-v_3 y v_2-v_3 .

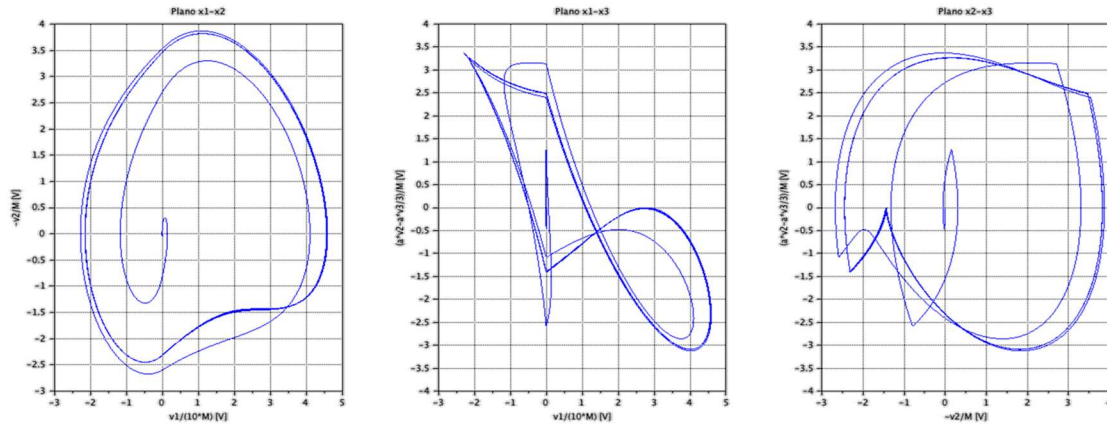


Fig. 24. Atractor de Sprott del modelo (29) con (34) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

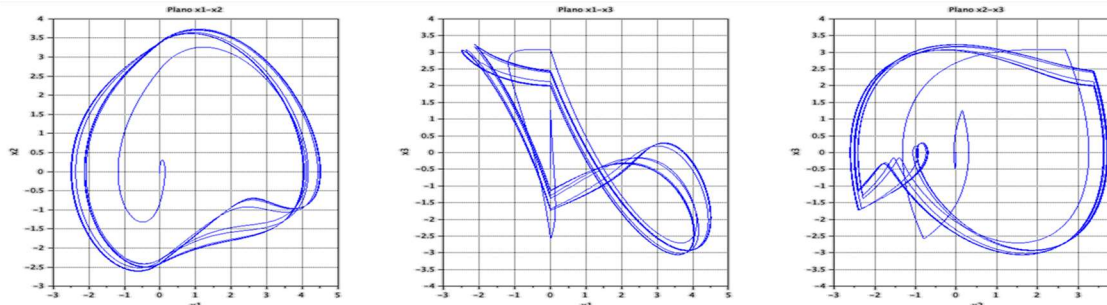


Fig. 25. Atractor de Sprott del modelo adimensional (25) con (35), en planos x_1-x_2 , x_1-x_3 y x_2-x_3 .

En la figura 26, se muestran los voltajes del circuito analógico de las figuras 4 y 5.d en proyecciones planares de su atractor con Multisim. En la figura 27, se muestra el atractor del modelo (29) y (36), obtenido para ese circuito. En la figura 28, se muestra el atractor del modelo (29) y (36) mapeado a la escala equivalente del sistema (25) y (37). En la figura 29, se muestra el atractor del sistema adimensional (25) y (37) mediante Scilab.

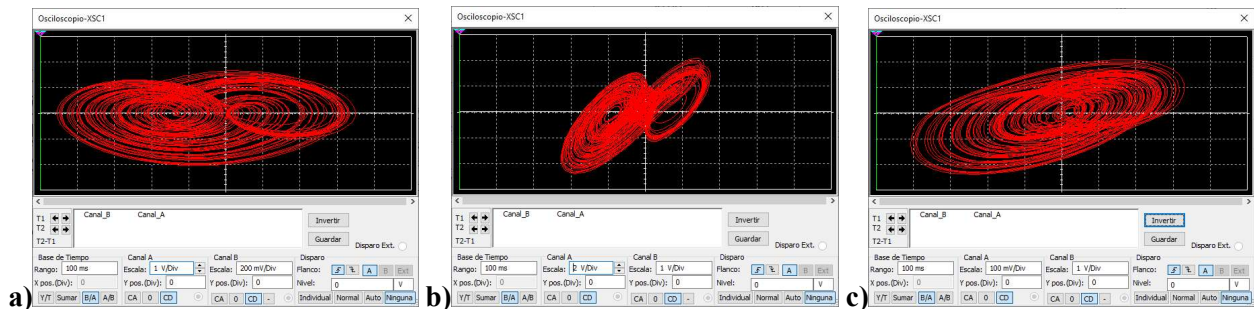


Fig. 26. Atractor de Sprott del circuito de las figuras 4 y 5.d, en planos v_1-v_2 (a), v_1-v_3 (b) y v_2-v_3 (c).

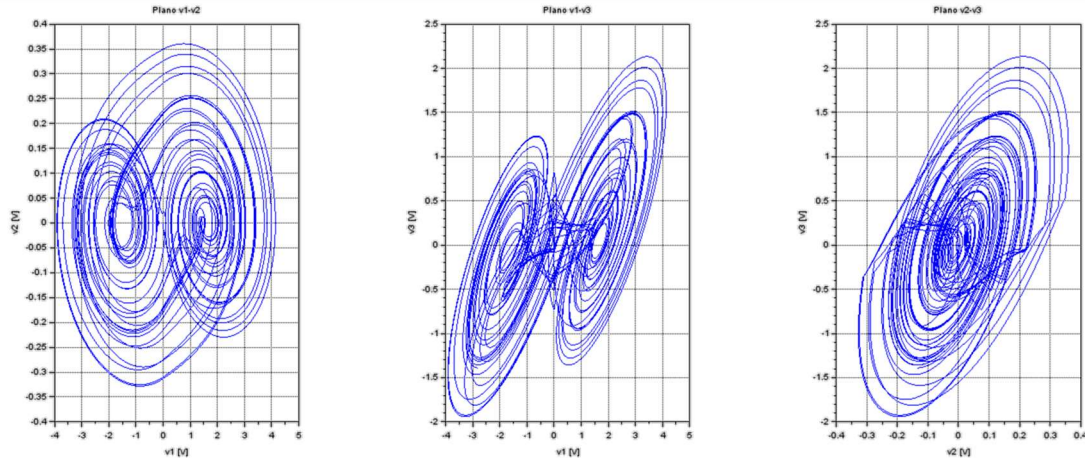


Fig. 27. Atractor de Sprott del modelo (29) con (36) del circuito, en planos v_1 - v_2 , v_1 - v_3 y v_2 - v_3 .

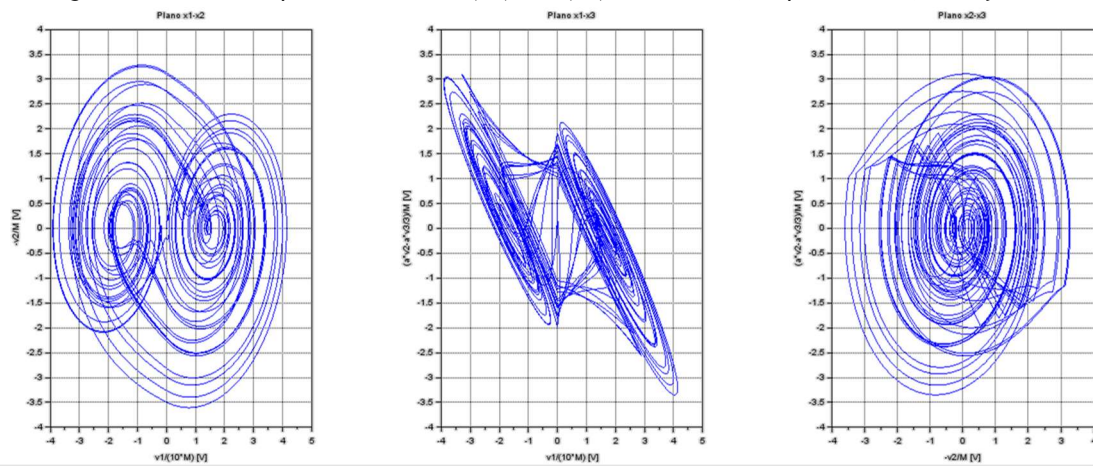


Fig. 28. Atractor de Sprott del modelo (29) con (36) mapeado a escala x_1, x_2, x_3 , en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

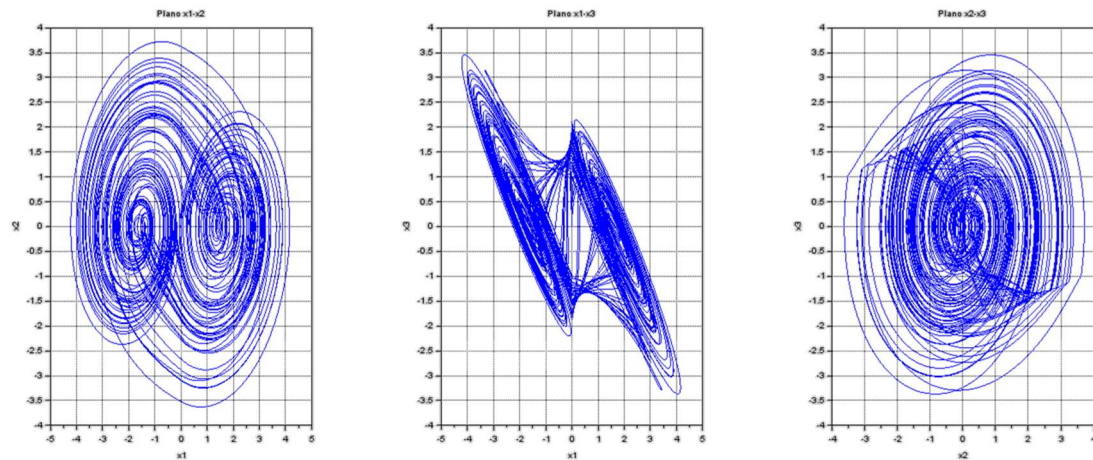


Fig. 29. Atractor de Sprott del modelo adimensional (25) con (37), en planos x_1 - x_2 , x_1 - x_3 y x_2 - x_3 .

Discusión de resultados

Como puede verse en las figuras 6, 10, 14, 18, 22 y 26, 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 y 27, 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 y 28, 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 y 29, respectivamente. Por lo que puede concluirse que son válidas tanto las realizaciones electrónicas presentadas, los modelos matemáticos obtenidos (9)-(10), (24)-(23) y (29) con (30), (32), (34) y (36), así como los mapeos y equivalencias de parámetros y variables calculados para cada sistema caótico.

CONCLUSIONES

En esta segunda parte, se mostró la realización y modelado de algunos sistemas caóticos lineales por tramos, utilizando diodos y op-amp. Particularmente, se explica con detalle la equivalencia y modelado de uno de los circuitos más conocidos, el sistema de Chua. 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, lo cual no se encuentra en muchos de los trabajos en la literatura. Esto se observa en las señales de osciloscopio del software de simulación electrónica Multisim, que muestran una reproducción de los atractores caóticos con características congruentes con los de simulaciones de los modelos matemáticos en el software Scilab. Particularmente, con los modelos y equivalencias obtenidos fue posible ajustar los valores de componentes para acotar las señales de voltaje y corrientes en rangos de operación posibles, debido a las limitaciones propias en circuitos electrónicos. En la siguiente parte de este trabajo, se mostrará la implementación de sistemas caóticos en dispositivos digitales.

REFERENCIAS

1. Matsumoto, T. A Chaotic Attractor from Chua's Circuit. *IEEE Trans. Circuits Syst.* (1984) 31(12): 1055-1058.
2. Kennedy, M.P. Robust Op Amp Realization of Chua's Circuit. *Frequenz.* (1992) 46(3): 66-80.
3. Conde S., G. and Ramírez A, G.M. Estudio de dos circuitos caóticos. *Revista Boliviana de Física.* (2007) 13: 58-74.
4. Pisarchik, A. N. and Jaimes-Reátegui, R. Homoclinic Orbits in a piecewise linear Rössler-like circuit. *Journal of Physics: Conference Series.* (2005) 23: 014.
5. Canals, V., Morro, A., and Rossello, J. L. Random number generation based on the Rossler attractor. *IEICE Proceeding Series.* (2014) 1: 272-275.
6. Sprott, J.C. A new class of chaotic circuit. *Physics Letters A*, 2000; 266: 19-23.
7. Hambley, A.R., *Electronics*, (2000) Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall.
8. Zanin M, Sevilla-Escoboza JR, Jaimes-Reátegui R, García-López JH, Huerta-Cuellar G, Pisarchik AN. Synchronization attack to chaotic communication systems. *Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity.* (2013) 1: 333-343.

Algoritmo de encriptado empleando sistemas caóticos de orden no entero en imágenes médicas

Cornelio Posadas-Castillo¹, Ernesto Zambrano-Serrano^{1*}, Miguel Angel Platas-Garza¹, Pedro Javier García-Ramírez², José Ramón Rodríguez-Cruz¹

¹Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, N.L., México

²Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, México

cornelio.posadascs@uanl.edu.mx; ernesto.zambranos@uanl.edu.mx;

miguel.platasgrz@uanl.edu.mx; jagarcia@uv.mx; jose.rodriguezcu@uanl.edu.mx

RESUMEN

Una de las técnicas más eficientes para proteger las imágenes médicas es aplicar algoritmos basados en dinámica no lineal. En este trabajo se presenta un esquema de encriptación y compresión de imágenes médicas. El esquema se basa en sistemas caóticos de orden fraccionario, combinados con compresión por transformada de wavelet discreta. El encriptado realiza ciclos de operaciones digitales entre las soluciones del sistema dinámico y la imagen a encriptar, agregando las características de confusión y difusión a la imagen. Los resultados experimentales y análisis estadísticos muestran desempeños adecuados para aplicación en imágenes médicas en presencia de múltiples ataques y ruido.

PALABRAS CLAVE

Cálculo fraccionario, Sistema Caótico; Encriptación; Imágenes Biomédicas.

ABSTRACT

One of the most efficient techniques to protect medical images is to apply algorithms based on nonlinear dynamics. This paper presents an encryption and compression scheme for medical images. The scheme is based on fractional-order chaotic systems, combined with a discrete wavelet transform compression. The encryption performs digital cycle operations between the solutions of the dynamic system and the image to be encrypted, adding the characteristics of confusion and diffusion to the image. The experimental results and statistical analyzes show adequate performance for application in medical imaging in the presence of multiple seizures and noise.

KEYWORDS

Fractional calculus, Chaotic system; Encryption; Biomedical Imaging.

INTRODUCCIÓN

Con el rápido desarrollo de la tecnología en dispositivos médicos, ha llegado a ser muy común diagnosticar diferentes enfermedades por medio de utilizar imágenes médicas. Las imágenes médicas son parte relevante del *expediente clínico*, el cual es un instrumento de gran relevancia para la materialización del derecho a la protección de la salud, de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-004-SSA3-2012. El expediente clínico “es el conjunto único de información y datos personales de un paciente, puede estar integrado por documentos escritos, gráficos, imagenológicos, electrónicos, magnéticos, electromagnéticos, ópticos, magneto-ópticos y de otras tecnologías, mediante los cuales se hace constar en diferentes momentos del proceso de la atención médica, las diversas intervenciones del personal del área de la salud, así como describir el estado de salud del paciente; además de incluir en su caso, datos acerca del bienestar físico, mental y social del mismo”.¹ Con la creciente popularidad de las comunicaciones inalámbricas, la seguridad de la información se ha vuelto esencial durante la transmisión de datos. Las imágenes médicas son comúnmente

transmitidas a través de diferentes canales públicos, lo que implica que la seguridad de las imágenes y otros archivos multimedia requieren una seguridad sólida para garantizar su confidencialidad y la privacidad. Por lo tanto, el encriptado de imágenes como: mamografías, resonancias magnéticas, radiografías de tórax, tomografías, etc; es una de las estrategias más convenientes para proteger la seguridad de los datos personales de los pacientes contra ataques maliciosos. Dado que las imágenes médicas son los datos privados de los pacientes, garantizar la integridad, el almacenamiento y transmisión se ha convertido en un tema de interés.

Las imágenes tienen varias características, por ejemplo, alta redundancia, gran capacidad de datos, fuerte correlación entre píxeles adyacentes y baja entropía en comparación con el texto.² A diferencia de las imágenes tradicionales las imágenes médicas presentan una característica distintiva, es decir, en promedio presentan más del 70% de bits de valor 0, lo que hace que los algoritmos de encriptación que no consideran esa característica en su diseño, al ser aplicados a imágenes médicas, presenten resultados adversos. En términos generales, se ha observado que la alta proporción de bits de valor 0 degrada el impacto de encriptado de las operaciones de permutación y sustitución.³ En consecuencia, existe la necesidad de un algoritmo de encriptación de imágenes, adecuado y eficiente con la finalidad de adaptarse al desafío del alto número de bits de valor 0 presentes en las imágenes médicas. Además, debe responder a la baja complejidad y alta eficiencia que requieren las aplicaciones de comunicaciones inalámbricas.

Es bien sabido que el Estándar de Encriptado Avanzado (*Advanced Encryption Standard*, AES) es un encriptado de bloque que tiene varias ventajas cuando se trata de cifrar texto. Tiene un enfoque de encriptado relativamente rápido y un algoritmo robusto contra la piratería. Además, de acuerdo con,³ para una clave de 128 bits, se necesitan alrededor de 2^{128} intentos para descifrarla. Sin embargo, el encriptado AES no es adecuado para datos multimedia ya que es computacionalmente extenuante; como consecuencia se requiere más tiempo computacional y no es lo suficientemente factible para el encriptado de imágenes médicas. Por lo tanto, numerosos investigadores en el campo del encriptado de imágenes han propuesto nuevos encriptados para reducir la correlación y la redundancia entre píxeles.⁵ En⁶ se presenta un algoritmo de encriptación de imágenes médicas el cual consiste en insertar datos aleatorios, codificación de alta velocidad y la difusión adaptativa de píxeles.

En particular, se ha observado que, los sistemas caóticos se utilizan ampliamente en criptografía. Debido a propiedades específicas del caos como la ergodicidad, la sensibilidad a las condiciones iniciales/parámetros del sistema y las características pseudoaleatorias.⁷ Estas propiedades están vinculadas a la aleatoriedad, la confusión y la difusión, que son necesarias para un buen encriptado. En el proceso de confusión, los píxeles de la imagen se reorganizan sin ningún cambio en sus valores, con el objetivo de ocultar las correlaciones entre los píxeles adyacentes. Mientras que, en el proceso de difusión, los valores de los píxeles se modifican secuencialmente, tratando de cambiar las características estadísticas de la imagen, de modo que una alteración menor en la imagen conduce a cambios significativos en la imagen encriptada.⁸

En general, un buen algoritmo de encriptado debe ser sensible a las claves de encriptado y el espacio de claves debe ser lo suficientemente grande como para resistir los ataques de fuerza bruta de los atacantes. Por lo tanto, los algoritmos de encriptado de imágenes basados en caos se han desarrollado en dos principales direcciones en los últimos años.⁸ La primera tendencia es mejorar la seguridad del algoritmo mediante el diseño de un sistema con un mejor comportamiento caótico.⁹ En,¹⁰ se propone el encriptado de imágenes considerando el comportamiento dinámico de un sistema caótico de orden fraccionario para mejorar la robustez y la seguridad del algoritmo de encriptado. Otra forma es por medio de integrar el encriptado basado en el caos con otras tecnologías de encriptado para diseñar algoritmos con mayor seguridad. En,¹¹ se presenta un algoritmo para diseñar una caja de sustitución de $n \times n$ -bits basada en series temporales generadas a partir de un mapa logístico. En,¹² se propone un esquema de encriptación de imágenes en color usando codificación de ADN basado en sincronización caótica.

Con base en la revisión y el análisis mostrados previamente, resumimos los estudios relacionados en las dos direcciones anteriores y combinamos las fortalezas de cada uno. Proponiendo un esquema

de encriptado eficiente en el que se consideran los procesos de compresión y encriptado de imágenes médicas. El algoritmo utiliza osciladores caóticos de orden fraccionario y rondas (ciclos) de operaciones digitales entre los estados vectoriales del sistema de orden fraccionario y la imagen a encriptar. Implementamos la transformada wavelet discreta DWT con el objetivo de reducir la cantidad de datos a enmascarar, así como disminuir la cantidad de iteraciones para el algoritmo de integración numérica de orden fraccionario Grünwald-Letnikov (GL). El análisis de seguridad y los resultados experimentales muestran que el algoritmo propuesto tiene un adecuado espacio de claves y sensibilidad a las claves, lo cual es eficiente frente a los ataques de fuerza bruta y estadísticos. Finalmente, la evaluación de este trabajo se realiza a través de medir la entropía de la información, el coeficiente de correlación, la tasa de número de píxeles cambiantes (*Number of Changing Pixel Rate*, NPCR) y la intensidad cambiada promedio unificada (*Unified Averaged Changed Intensity*, UACI).

METODOLOGÍA UTILIZADA

La metodología usada es descrita en la figura 1, donde se plantea un esquema de encriptado, compresión y transmisión. La transmisión se realiza por medio de dos radios NI-USRP del fabricante National Instruments. Una de las principales contribuciones de este trabajo es el analizar el efecto de cada etapa (encriptado, compresión y transmisión) de manera conjunta.

Oscilador de Liu de orden fraccionario (Generador de Caos)

En este artículo se considera el sistema caótico de Liu de orden fraccionario, el cual es definido de la siguiente forma:⁸

$$\begin{aligned} {}^{GL}D^q x(t) &= -ax(t) - ey(t)^2, \\ {}^{GL}D^q y(t) &= by(t) - kx(t)z(t), \\ {}^{GL}D^q z(t) &= -dz(t) + mx(t)y(t), \end{aligned}$$

donde $x(t)$, $y(t)$, y $z(t)$ son variables de estado, a, b, d, e, k y m son parámetros positivos, $q \in (0,1)$ es el orden fraccionario, ${}^{GL}D^q$ es la derivada de orden fraccionario en el sentido de Grünwald-Letnikov. Los puntos de equilibrio del sistema y sus valores propios son mostrados en la tabla I, los cuales son obtenidos definiendo ${}^{GL}D^q x(t) = 0$, ${}^{GL}D^q y(t) = 0$, y ${}^{GL}D^q z(t) = 0$, considerando el siguiente conjunto de parámetros $a = 1, b = 2.5, d = 5, e = 1, k = 4$ y $m = 4$. Se observa que el sistema presenta tres puntos de equilibrio reales y dos imaginarios, respectivamente.

Las simulaciones numéricas se realizaron considerando el algoritmo propuesto por Grünwald-Letnikov e implementado en,⁸ considerando el principio de memoria corta con valor de $L = 200$, un orden fraccionario $q = 0.95$, un paso de integración $h = 0.01$. En la figura 2, se muestran el plano de fase del sistema de Liu.

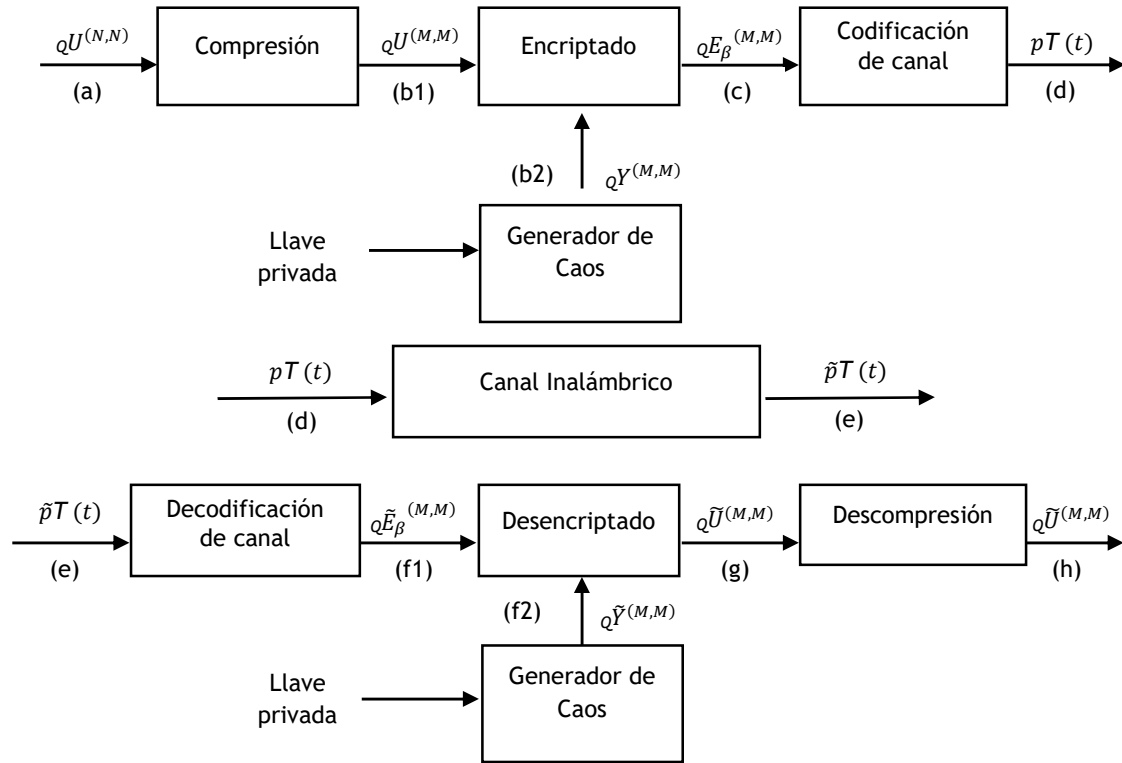
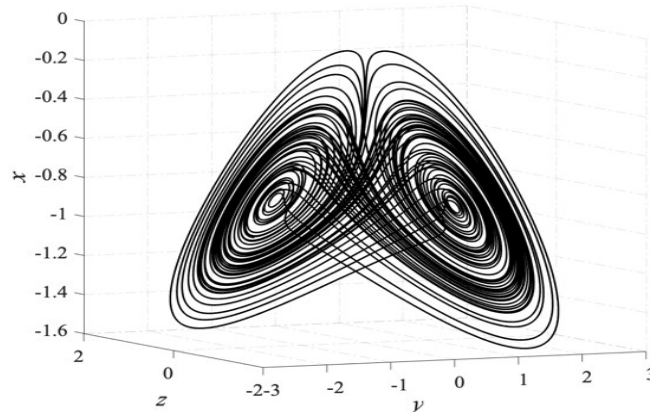


Fig. 1. Diagrama de bloques que describe la compresión, el encriptado y la transmisión inalámbrica de los datos. El estado $y(t)$ se utiliza en todas las operaciones de enmascaramiento realizadas. La marca (a) representa los datos a cifrar, (b1) los datos comprimidos, (b2) la llave en el codificador, (c) los datos encriptados, (d) los pulsos encriptados que se transmitirán, (e) el tren de pulsos recibido, (f1) los datos encriptados recuperados, (f2) la llave en el decodificador, (g) los datos comprimidos recuperados, (h) los datos recuperados.

Tabla I. Puntos de Equilibrio del sistema de Liu de orden fraccionario.

Puntos de Equilibrio	Valores propios	
	λ_1	$\lambda_{2,3}$
$E_1(0,0,0)$	-1	2.5, -5
$E_2(-0.8838, 0.9401, -0.6647)$	-4.3877	$0.4438 \pm 3.3463i$
$E_3(-0.8838, -0.9401, 0.6647)$	-4.3877	$0.4438 \pm 3.3463i$
$E_4(0.8838, 0.9401i, 0.6647i)$	-4.3877	$0.4438 \pm 3.3463i$
$E_5(0.8838, -0.9401i, -0.6647i)$	-4.3877	$0.4438 \pm 3.3463i$


 Fig. 2. Plano de fase del sistema de Liu de orden fraccionario $q = 0.95$.

Encriptado

Una llave de 128 bits es usada en este trabajo. Los bits de la llave representan una combinación de orden, y condiciones iniciales previamente preseleccionadas dentro de rangos finitos donde la existencia de caos es asegurada. Una vez seleccionada la llave adecuadamente considerando un cierto orden fraccionario, un conjunto de parámetros y condiciones iniciales, se generan $K = M^2$ muestras de la señal caótica de orden fraccionario utilizando el algoritmo de integración numérico propuesto por GL. Los estados del oscilador $x(t)$, $y(t)$, y $z(t)$ se cuantifican en Q bits, y los M^2 valores de cada estado se almacenan en arreglos $qX^{(M,M)}$, $qY^{(M,M)}$, $qZ^{(M,M)}$.

Las β operaciones se aplican entre la imagen de entrada y los estados para generar la imagen encriptada $qE_\beta^{(M,M)}$. Las operaciones se implementan de forma serial, ejecutando cada operación entre algún estado del sistema $qS_\beta^{(M,M)}$ y el resultado de la operación anterior $qE_{\beta-1}^{(M,M)}$. Denotando el conjunto de operaciones por las funciones $\{\psi_1, \psi_1, \dots, \psi_\beta\}$, la imagen encriptada en el nivel β debe estar dada por:

$$qE_\beta^{(M,M)} = \psi_\beta\{qS_\beta^{(M,M)}, qE_{\beta-1}^{(M,M)}\}, \quad (1)$$

donde

$$qE_{\beta-1}^{(M,M)} = \psi_{\beta-1}\{qS_{\beta-1}^{(M,M)}, qE_{\beta-2}^{(M,M)}\}, \quad (2)$$

$$qE_{\beta-2}^{(M,M)} = \psi_{\beta-2}\{qS_{\beta-2}^{(M,M)}, qE_{\beta-3}^{(M,M)}\}, \quad (3)$$

$$\vdots$$

$$qE_1^{(M,M)} = \psi_1\{qS_1^{(M,M)}, qE_0^{(M,M)}\}, \quad (4)$$

siendo $qE_0^{(M,M)} = qU^{(M,M)}$ la imagen médica a encriptar.

Operaciones de encriptado

Las operaciones consideradas en este trabajo son:

- La operación lógica OR-exclusivo (XOR). La operación j -ésima del esquema puede implicar la operación XOR, que se define a nivel de bit entre todos los píxeles de la imagen.
- Rotación circular de bits a la derecha (CIRCR). La operación j -ésima del esquema puede involucrar la operación CIRCR, que se aplica a nivel de bits entre dos píxeles de la imagen. La operación CIRCR indica que los bits Q que construyen el píxel $q_{j-1}^e(n, m)$ rotan, del bit más significativo (MSB) al bit menos significativo (LSB), el número entero dado por el elemento $qS_\beta(n, m)$.
- Rotación circular de bits a la izquierda (CIRCL). Similar a CIRCR, pero con la rotación circular del LSB al MSB.

- Rotación de píxeles en una línea a la derecha (PIXRR) y a la izquierda (PIXRL). Similar a CIRCRR y CIRCL, pero la rotación circular se realiza a nivel de píxel en las líneas horizontales de la imagen
- Rotación de píxeles en una columna a la derecha (PIXCR) y a la izquierda (PIXCL). Similar a PIXRR y PIXRL, pero la rotación circular se realiza sobre las columnas de la imagen.
- Operación de sustitución (SBOX). Se utiliza la *s-box* propuesta en.⁸ No se requiere la señal caótica para realizar esta operación, que se aplica a nivel de píxel. La *s-box* de representa una función invertible que sustituye cada píxel del plano por otro valor.
- Operación de permutación (PBOX). La matriz separable de distancia máxima (MDS)

$$Q^{P(4 \times 4)} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

se utiliza como caja de permutación. Este cuadro se multiplica por bloques adyacentes de 4 píxeles. La multiplicación se realiza en el campo de Galois GF (2⁸). Nuevamente, usamos una matriz MDS bien conocida como caja de permutación para asegurar un sistema criptográficamente seguro.⁸ En nuestro caso, si la operación se aplica a bloques más grandes, la convolución bidimensional se realiza entre los elementos de la caja y los datos de entrada. Usamos convolución, a diferencia de otros trabajos donde el cuadro de permutación se aplica a bloques de datos adyacentes. Esto puede aumentar el tiempo de cálculo porque cada línea de píxeles se procesará cuatro veces. Sin embargo, un mayor número de iteraciones puede causar relaciones más complejas en el encriptado.

Compresión

En la etapa de compresión, se aplica la DWT de η niveles a $Q^{U(N,N)}$, lo que da como resultado una aproximación $U^{(M,M)}$ con $M \approx \frac{N}{\eta}$, y 3η grupos de coeficientes a diferentes escalas. Debido a que la mayoría de las imágenes son de naturaleza de paso bajo, solo se considera una aproximación a $U^{(M,M)}$ y los detalles de alta frecuencia se descartan en los componentes horizontal, vertical y diagonal.

Posteriormente, se aplica una cuantificación uniforme con niveles de 2^Q a cada píxel de $U^{(M,M)}$ generando la señal $Q^{U^{(M,M)}}$.

RESULTADOS

En esta sección presentamos algunos resultados experimentales. El sistema completo considera el esquema que se muestra en la figura 1. El esquema de compresión y encriptación realizado por el transmisor se realiza utilizando una secuencia plana, donde la salida de cada etapa alimenta la entrada de la siguiente. El receptor realiza un proceso similar. El rendimiento de las diferentes etapas del sistema se evalúa a través de varias métricas, como la entropía de la información, coeficientes de correlación (CC), número de tasa de cambio de píxeles (NPCR), intensidad de cambio promedio unificado (UACI), robustez de ruido y complejidad computacional por medio de análisis de tiempo. Se utilizó una radiografía de tórax en escala de grises de 8 bits. El tamaño de la imagen utilizada es de 512×512 píxeles. Las imágenes de prueba se muestran en la figura 3, la cual consiste en una radiografía de tórax. Las radiografías o los rayos X del tórax, utilizan una dosis muy pequeña de radiación ionizante para producir imágenes del interior del tórax. Se utiliza para evaluar los pulmones, la pared del pecho y el corazón, se puede diagnosticar la bradipnea, tos persistente, fiebre, dolor de pecho o algunas lesiones internas. También ayuda a diagnosticar y monitorear tratamientos de una variedad de condiciones de los pulmones como la neumonía, el enfisema y el cáncer. Debido a que los rayos X del tórax son rápidos y fáciles, resultan particularmente útiles para diagnósticos y tratamientos de emergencia.



Fig. 3. Radiografía de tórax considerada como imagen de prueba.

Métricas de encriptado

En una primera instancia, evaluamos el proceso de encriptado que se mostró previamente, asumiendo un canal ideal, eliminando la etapa de compresión y considerando diferentes rondas (ciclos) de encriptación κ .

Para cada valor de κ se calcularon 30 ejecuciones, en cada ciclo se seleccionó una clave de forma aleatoria. La tabla II, muestra la entropía mínima, máxima y promedio de la imagen encriptada para diferentes valores de κ (ciclos de encriptación). En todos los casos abordados, la entropía de los datos encriptados está cerca de su valor ideal $H = 8$.

Tabla II. Promedio, mínimo y máximo para la entropía de información H . Para calcular cada valor se realizaron 30 rondas con claves aleatorias.

Imagen	κ	$\min(H)$	$\max(H)$	Promedio (H)
Torax	1	7.99920579	7.99938443	7.99931478
	2	7.99917575	7.99938282	7.9993149
	4	7.99918183	7.99944923	7.99929086

Los coeficientes de correlación en las direcciones horizontal CC_x , vertical CC_y y diagonal $CC_{x,y}$ también se calcularon para la imagen. Se utilizaron diferentes claves aleatorias y $\kappa = 1, 2, 4$ rondas. Para cada caso abordado, separamos pares de 1000 píxeles adyacentes en las direcciones horizontal, vertical y diagonal de la imagen original y encriptada. Los coeficientes de correlación se calcularon a partir de estos conjuntos. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla III donde, se puede apreciar una correlación más débil de la imagen encriptada con respecto a la imagen original. El valor ideal para los coeficientes de correlación en una imagen cifrada es de cero.

Tabla III. Coeficientes de correlación de las imagen original y encriptada, para cada imagen se considera $\kappa = 1, 2, 4$ ciclos. En cada ejecución, se seleccionaron aleatoriamente conjuntos de 1000 píxeles adyacentes en la dirección apropiada y se calcularon sus coeficientes de correlación.

Imagen	Caso	Horizontal CC_x	Vertical CC_y	Diagonal $CC_{x,y}$
Torax	Sin encriptar	0.9967	0.9951	0.9923
	Encriptado con $\kappa = 1$	0.0052	-0.0012	-0.0154
	Encriptado con $\kappa = 2$	-0.0273	-0.0284	-0.0118
	Encriptado con $\kappa = 4$	0.0203	0.0150	0.0533

Análisis de sensibilidad

La sensibilidad a la llave es importante como medida de seguridad. Esta capacidad generalmente se mide cuantitativamente a través de la tasa de cambio del número de píxeles (NPCR) y la intensidad

de cambio promedio unificada (UACI). Las tablas IV y V, muestran el valor mínimo, máximo y promedio de ambas métricas, para las cuatro imágenes de prueba y para $\kappa = 1,2,4$. Nuevamente, para cada caso se realizaron 30 ejecuciones. En cada ejecución, se alternaba un bit aleatorio de la clave. Como se puede observar en las tablas IV y V el NPCR indica que, en todos los casos abordados, este mínimo cambio en la clave produce al menos un cambio en el 99.25% de los píxeles de encriptado. Por otra parte, los valores de UACI indican que un cambio mínimo en la clave produce una diferencia de intensidad media de 33.43% en los píxeles de encriptado. De las tablas IV y V, se puede ver que el encriptado tiene un nivel de seguridad aceptable para un cambio de bit en la clave secreta.

Tabla IV. Sensibilidad de la clave. Promedio, mínimo y máximo para la métrica NPCR. Donde para cada imagen se realizaron 30 ejecuciones. En cada ejecución, se alternaba un bit aleatorio de la clave.

Imagen	κ	min (NPCR)	max (NPCR)	promedio (NPCR)
Torax	1	99.25651%	99.61280%	99.48883%
	2	99.59182%	99.63531%	99.61793%
	4	99.59411%	99.63569%	99.61530%

Tabla V. Sensibilidad clave. Promedio, mínimo y máximo para la métrica UACI. Para cada imagen se calcularon 30 ejecuciones. En cada ejecución, se alternaba un bit aleatorio de la clave.

Imagen	κ	min (UACI)	max (UACI)	promedio (UACI)
Torax	1	33.09046%	33.51029%	33.36043%
	2	33.40805%	33.49997%	33.45852%
	4	33.42108%	33.56761%	33.47018%

Tabla VI. PSNR promedio, mínimo y máximo para $\kappa = 1,2,4$ y ruido con $p = 0.01, 0.001, 0.0001$.

Imagen		$p = 0.01$		$p = 0.001$			$p = 0.001$			
		min	max	min	min	max	avg	min	max	avg
Torax	1	19.75	19.92	19.82	29.31	29.92	29.59	38.92	41.52	39.91
	2	14.41	14.38	14.35	23.60	24.36	23.89	32.76	34.74	33.57
	4	8.77	8.77	8.72	12.70	13.00	12.80	21.10	22.69	21.96

Robustez ante ruido

Un encriptado debe ser resistente al ruido para evitar distorsiones en la imagen desencriptada inducidas por cambios en la imagen encriptada. Estos cambios podrían estar relacionados con el proceso de transmisión o con el proceso de encriptado en sí. En este documento, la robustez contra el ruido se evalúa agregando ruido de sal y pimienta a la imagen encriptada. El ruido de Sal y Pimienta (SP) es uno de los ruidos más populares que afectan la calidad de la imagen digital, y la probabilidad de que aparezca un píxel blanco o negro viene dada por una probabilidad $p \leq \frac{1}{2}$. Agregamos ruido de Sal y Pimienta a los datos encriptados, y luego estos datos ruidosos se descifran. La tabla VI muestra el PSNR entre los datos de desencriptado sin ruido y los datos de desencriptado con ruido. Los valores más altos para el PSNR indican que el encriptado es más robusto contra el ruido. La robustez del ruido disminuye cuando κ aumenta.

Análisis y compresión del tiempo

El esquema de encriptado se realizó en dos dispositivos. El primer dispositivo, denominado Dispositivo 1 el cual es una PC con una CPU Intel Core i7 a 2,60 GHz, 8 MB de RAM DDR4 y una unidad de estado sólido de 1 TB con Ubuntu 18.04 LTS. El segundo dispositivo, etiquetado como Dispositivo 2, es una placa Raspberry Pi 4 modelo B con un Cortex-A72 de cuatro núcleos que funciona a 1,5 GHz, 4 GB de RAM y una microSD de 32 GB que ejecuta Raspbian 10. El rendimiento

de tiempo logrado por ambos dispositivos se muestra en la tabla VII. En ambos casos, se utilizó el mismo script de Python 2.7.

Tabla VII. Tiempo necesario para realizar el proceso de encriptación de la imagen de tórax para diferentes esquemas de compresión y número de rondas. PSNR logrado cuando se agrega una etapa de compresión DWT de un nivel. Se informa el tiempo de encriptado logrado con una computadora portátil (Dispositivo 1) y una placa Raspberry Pi 4 modelo B (Dispositivo 2).

	κ	Pasa bajas únicamente			Pasa bajas + detalles		
		Tiempo dispositivo 1	Tiempo dispositivo 2	PSNR	Tiempo dispositivo 1	Tiempo dispositivo 2	PSNR
Sin compresión $\eta = 0$	1	11.89 seg.	11.89 seg.	∞ dB	-	-	-
	2	19.87 seg.	19.87 seg.		-	-	-
	4	29.08 seg.	29.06 seg.		-	-	-
Con compresión $\eta = 1$	1	3.02 seg.	13.85 seg.	31.50 dB	28.27	28.71	55.76 dB
	2	4.43 seg.	20.62 seg.		22.52	23.23	
	4	7.44 seg.	35.52 seg.		11.59	11.87	

El tiempo necesario aumenta con κ para ambos niveles de compresión $\eta = 0$ y 1, donde ambos dispositivos (Dispositivo 1 y Dispositivo 2). Cuando se agrega la etapa de compresión, y solo se considera la versión paso bajo de la imagen, se reduce el tiempo promedio en todos los casos abordados, y se logra un PSNR de 36.60 dB entre la salida del desencriptado y el plano. Por otro lado, cuando se agregan detalles en la compresión, se aumenta el tiempo promedio y se mejora el PSNR a 55.77 dB. La reducción de tiempo se consigue en todos los casos en los que se utiliza una etapa de compresión.

Remarcamos que se usaron dos dispositivos en esta sección debido al uso potencial de este algoritmo de encriptado en futuras aplicaciones de PC de escritorio, así como en aplicaciones embebidas. Como era de esperar, el Dispositivo 2 tiene un rendimiento menor respecto al Dispositivo 1 debido a sus recursos limitados.

Comparación con otros algoritmos de encriptado

Aquí mostramos los resultados de la comparación del método de encriptado y las referencias.^{13, 14, 15, 16} En todos los casos se utiliza la imagen Lena en escala de grises 512×512 . La tabla VIII presenta los resultados.

Tabla VIII. Comparación con otros algoritmos de encriptado. La información en las últimas dos columnas refleja el valor máximo para $\kappa = 16$.

Métrica	[13]	[14]	[15]	[16]	$\kappa = 16$
Entropy	7.999419	7.9964	7.999319	7.9994	7.9991
NPCR	99.62%	$\approx 0\%$	99.62%	99.60%	99.63%
UACI	33.45%	$\approx 0\%$	33.48%	33.46%	33.59%

Resultados para el sistema completo

Los resultados para todo el sistema representado por la figura 1 se muestran en las figuras 4. Aquí las señales de prueba fueron procesadas por todas las etapas (compresión, encriptación y transmisión). En todos los casos se utilizó el valor $\kappa = 4$. Los valores más altos de κ mejoran NPCR y UACI, pero disminuyen la tolerancia al ruido. Como se puede observar cualitativamente, en todos los casos abordados se logra la reconstrucción. Es importante resaltar que, en todos los casos, el texto encriptado se transmitió experimentalmente utilizando los módulos de radio definidos por software usando modulación PSK.

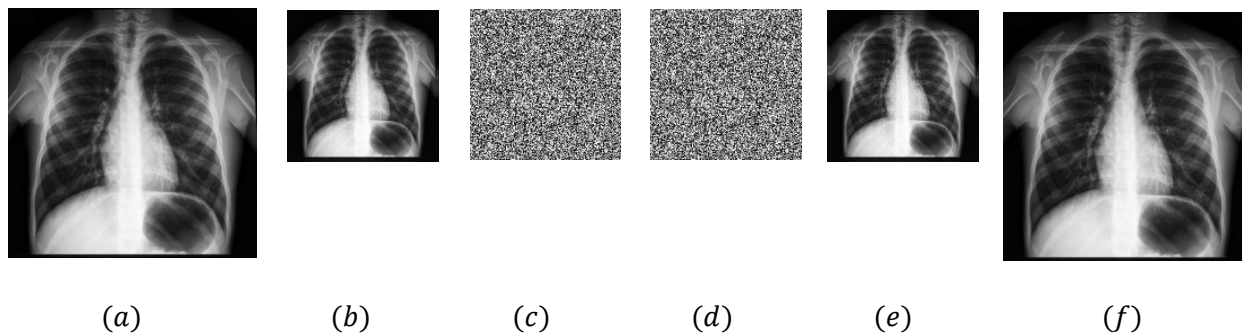


Fig. 4. Resultados para la radiografía de tórax. (a) Imagen original $QU^{(N,N)}$; (b) Imagen comprimida y cuantizada por $QU^{(M,M)}$; (c) Imagen encriptada a ser transmitida; (d) Imagen encriptada $QE_{\beta}^{(M,M)}$ recibida; (e) Imagen desencriptada $QU_{\beta}^{(M,M)}$ en la salida del desencriptador. (f) Imagen recuperada.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un esquema de encriptación, compresión y transmisión. La compensación entre complejidad y rendimiento es adecuada para varias aplicaciones. La seguridad se evaluó a través de NPCR y UACI, ambas métricas muestran una sensibilidad satisfactoria a los cambios presentados en la clave cuando se utilizan suficientes rondas de encriptado. Por otra parte, el efecto de las degradaciones de transmisión se amplifica si se utiliza un gran número de rondas. Entonces, se debe considerar un equilibrio adecuado entre la sensibilidad y la robustez del ruido. El proceso de encriptado se comparó con otros algoritmos encontrados en la literatura. Como se muestra en la tabla VIII, se logró un desempeño competitivo. Además, si se utiliza la etapa de compresión de transformada de wavelet discreta, el tiempo de encriptado se reduce considerablemente. Finalmente, es importante resaltar que, luego de varios experimentos, los resultados mostraron desempeños adecuados para varias aplicaciones en un entorno físico de comunicaciones inalámbricas. Como trabajo futuro, proponemos aplicar este esquema de compresión-encriptado-transmisión a imágenes RGB. La investigación actual en el campo considera otros esquemas de compresión, encriptado y transmisión, así como soluciones de optimización conjunta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Electrónica y Automatización de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL, y a CONACYT/MÉXICO No. 166654, A1-S-31628.

REFERENCIAS

1. Secretaría de la salud, «NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SSA3-2012, Del expediente clínico.» [En línea]. Available: http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5272787. [Último acceso: 10 Marzo 2022].
2. M. Garcia-Martinez y E. Campos-Cantons, «Pseudo-random bit generator based on multi-modal maps,» *Nonlinear Dynamics*, vol. 82, n° 8, pp. 2119-2131, 2015.
3. A. Belazi, M. Talha, S. Kharbech y W. Xiang, «Novel medical image encryption scheme based on chaos and DNA encoding,» *IEEE access*, vol. 7, pp. 36667-36681, 2019.
4. C. H. Yang y Y. S. Chien, «FPGA Implementation and Design of a Hybrid Chaos-AES Color Image Encryption Algorithm,» *Symmetry*, vol. 12, n° 2, p. 189, 2020.
5. S. T. Kamal, K. Hosny, T. M. Elgindy, M. M. Darwish y M. M. Fouda, «A new image encryption algorithm for grey and color medical images,» *IEEE Access*, vol. 9, pp. 37855-37865, 2021.
6. Z. Hua, S. Yi y Y. Zhou, «Medical image encryption using high-speed scrambling and pixel adaptive diffusion,» *Signal Processing*, vol. 144, pp. 134-144, 2018.

7. H. E. Gilardi-Velázquez, J. L. Echenausía-Monroy, R. Jaimes-Reátegui, J. H. García-López, E. Campos y G. Huerta-Cuellar, «Deterministic coherence resonance analysis of coupled chaotic oscillators: fractional approach,» *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 157, p. 111919, 2022.
8. M. A. Platas-Garza, E. Zambrano-Serrano, J. Rodríguez-Cruz y C. Posadas-Castillo, «Implementation of an encrypted-compressed image wireless transmission scheme based on chaotic fractional-order systems,» *Chinese Journal of Physics*, vol. 71, pp. 22-37, 2021.
9. O. García-Sepúlveda, C. Posadas-Castillo, A. D. Cortés-Preciado, M. A. Platas-Garza, E. Garza-González y A. G. Sánchez, «Synchronization of fractional-order Lü chaotic oscillators for voice encryption,» *Revista mexicana de física*, vol. 66, n° 3, pp. 364-673, 2020.
10. R. Montero-Canela, E. Zambrano-Serrano, E. I. Tamariz-Flores, J. M. Muñoz-Pacheco y R. Torrealba-Meléndez, «Fractional chaos based-cryptosystem for generating encryption keys in Ad Hoc networks,» *Ad Hoc Networks*, vol. 97, p. 102005, 2020.
11. B. B. Cassal-Quiroga y E. Campos-Cantón, «Generation of dynamical S-boxes for block ciphers via extended logistic map,» *Mathematical Problems in Engineering*, p. 2702653, 2020.
12. J. Luo, S. Qu, Y. Chen y Z. Xiong, «Synchronization of memristor-based chaotic systems by a simplified control and its application to image en-/decryption using DNA encoding,» *Chinese Journal of Physics*, vol. 62, pp. 374-387, 2019.
13. Ahmad, M., Al Solami, E., Wang, X. Y., Doja, M. N., Beg, M. M., y Alzaidi, A. A. «Cryptanalysis of an image encryption algorithm based on combined chaos for a BAN system, and improved scheme using SHA-512 and hyperchaos. » *Symmetry*, vol 10 n° 7, 266, 2018.
14. Wang, W., Si, M., Pang, Y., Ran, P., Wang, H., Jiang, X., ... y Jeon, G. «An encryption algorithm based on combined chaos in body area networks. » *Computers & Electrical Engineering*, vol. 65, 282-291.2018.
15. Chen, J. X., Zhu, Z. L., Fu, C., Yu, H., y Zhang, L. B. «A fast chaos-based image encryption scheme with a dynamic state variables selection mechanism. » *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol 20, n°3, 846-860. 2015
16. Bashir, Z., Wątróbski, J., Rashid, T., Zafar, S., y Sałabun, W. «Chaotic dynamical state variables selection procedure based image encryption scheme. » *Symmetry*, vol 9, n°12, 312. 2017.

Weibull strength distribution and reliability S-N percentiles for tensile tests

Percentiles S-N de Confiabilidad y distribución de resistencia de Weibull para ensayos de tracción

Manuel Baro Tijerina^{1,*}, Manuel Piña Monarrez²

¹Industrial and Technology Department, Instituto Tecnológico Superior de Nuevo Casas Grandes, Casas Grandes, México.
al164467@alumnos.uacj.mx

²Industrial and Manufacturing Department at IIT Institute, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, México.
manuel.pina@uacj.mx

ABSTRACT

Based on the true stress σ_t , the ultimate material's strength S_{ut} , and the fatigue slope b values, the probabilistic percentiles of the S-N curve of ductile materials are formulated. The Weibull β and η parameters used to determine the product's reliability are both determined directly from the material's strength values that corresponds to 103 and 106 cycles. And since in Table corresponding to the properties of this A538 A (b) steel and collected by table 23-A of Shigley Mechanical Engineering Design book; authors present the σ_t , S_{ut} , and b values of several materials, then the Weibull parameters for each one of these materials as well as the 95% and 5% reliability percentiles of their S-N curves are given. A step-by-step application to the steel A538 A (b) material is presented. And based on the maximum and minimum applied stress values, the corresponding Weibull stress distribution was fitted and used with the Weibull strength distribution, in the stress/strength reliability function to determine the element's reliability.

KEYWORDS

Mechanical design; True stress-strain; Weibull distribution; Fatigue reliability analysis; Stress/Strength, Reliability Engineering.

RESUMEN

Basado en el estrés verdadero σ_t , la última resistencia del material S_{ut} , y la curva de fatiga b , la curva $S - N$ de material de acero dúctil es formulada. La distribución Weibull con parámetros β y η son usados para determinar la confiabilidad del elemento y ambos son directamente determinados por la resistencia del material que en este caso corresponde a 103 y 106 ciclos. Y como corresponde en la tabla de propiedades del acero A538 A (b) y recolectada esta información del libro de Ingeniería mecánica de Shigley: los autores presentan el estrés verdadero, último estrés y la curva de diferentes materiales. Entonces los parámetros Weibull β y η , así como los percentiles de confiabilidad 95 y 5 por ciento de la curva $S - N$ son presentados. Se presenta una aplicación paso por paso para el acero A538 A (b). Y basado en el máximo y mínimo estrés aplicado, la distribución Weibull correspondiente es presentada. Por último basado en el máximo y mínimo estrés, la distribución Weibull correspondiente fue ajustada y usada con la resistencia de la distribución Weibull, en la función estrés-resistencia de confiabilidad con el objeto de estimar la confiabilidad del elemento.

PALABRAS CLAVE

Diseño mecánico; Stres-resistencia; Distribución Weibull; Análisis de fatiga; Ingeniería de confiabilidad

INTRODUCTION

Since the reliability of a mechanical component depends on the applied stress value and on the strength that the used material presents to overcome the applied stress, then because both the applied stress and the material's strength are random variables, then researchers have been proposing to use a probabilistic stress-cycles S-N curves. However, because the probabilistic percentiles of the S-N curves is based on the common confidence interval (*CL*) of the expected average, as shown in section 3.3, then the proposed formulations are inefficient to perform a reliability analysis. Thus, in this paper based on the theory given in ¹, a Weibull methodology to determine the *strength distribution* and the *reliability percentiles* of the S-N curve are both given. In the proposed Weibull/tensile test methodology, the only needed inputs are **1)** the ultimate material's strength ² (S_{ut}) value, (which is a measure of the maximum stress that an object/material/structure can withstand without being elongated, stretched or pulled). **2)** the true stress (σ_t) ² value, (which measures the change in the area with respect to the time while the specimen is loading), and **3)** the fatigue slope b value of the S-N curve. With these three inputs, the corresponding strength Weibull shape β and scale $\eta_{(\sigma)}$ parameters used to determine the reliability percentiles of the S-N curve, are both determined based on the $S_f = fS_{ut}$ strength value that corresponds to $N_1 = 10^3$ cycles and on the strength (S_e) value that corresponds to $N_1 = 10^6$ cycles. The validation that the addressed strength β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters completely represent the S_f and S_e values, is demonstrated by showing that by using the β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters we *always can* reproduce the S_f and S_e values.

And because in the Table A-23 of the Shigly's book, for several steel materials, authors present their S_{ut} , σ_t and b values, then in this paper by using the proposed methodology, their corresponding strength β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters, the log-mean μ_x and log-standard deviation (σ_x) values, as well as the 95% and 5% reliability percentiles of their S-N curves are all given in section 6. *The novelty* of the given reliability percentiles is that they *do not represent a confidence interval CL* of the S-N curve, instead they represent *a reliability confidence interval* for the S-N curve. But more importantly notice that because the S-N reliability percentiles are the reliability percentiles of the strength $\eta_{(\sigma)}$ parameter, then because in any Weibull analysis the reliability percentiles of $\eta_{(\sigma)}$ are always determined, then automatically we can use these $\eta_{(\sigma)}$ percentiles as the corresponding S-N percentiles. Consequently, any Weibull strength analysis can be seen as a representation of the reliability percentiles of the related S-N curve ^{3,4}. Additionally, because the reliability of the component depends on the applied stress and on its strength, then in section 5, the Weibull strength parameters that represents the desired S-N reliability percentiles, and the Weibull parameters that represents the applied stress, are both used in the stress/strength methodology ⁵ to determine the reliability of the designed element.

The structure of the paper is as follows. Section 2 presents the generalities of a tensile test. In section 3, the steps of the proposed Weibull/Tensile/Reliability percentiles methodology are given. In section 4, a step by step application of the proposed method is given. In section 5, the stress/strength analysis to determine the reliability of the component is presented. In section 6 the Weibull β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters, the 95% and 5% reliability percentiles and the corresponding log-mean and log-standard deviation for each one of the steel materials given in the Table A-23 of the Shigly's book are provided. Finally, in section 7, the conclusions are presented.

TENSILE TEST GENERALITIES

In general, in a tensile test the material properties are directly measured from a sample that is tested at controlled tension force (F) until failure. The most general material's properties ² are the ultimate tensile strength S_{ut} , (it is a measure of the maximum stress that an object/material/structure can withstand without being elongated, stretched or pulled), the true stress σ_t , (it measures the change in the area with respect to time while the specimen is loaded), the maximum elongation (L), and the reduction in the initial area (A_0).

And since these material's properties are random variables, then in the analysis a probability density function (*pdf*) must be used ⁶ pg.10. In the analysis, the most used *pdfs* are the normal, lognormal and Weibull distributions. Fortunately, as demonstrated in ⁷, for mechanical stress the best distribution is the Weibull distribution, and from ¹ we have that from the Weibull analysis we always can reproduce the analyzed principal stresses (or strength) values. Therefore, in this paper the Weibull distribution is used. Also notice that for $\beta \approx 3.4$ the Weibull distribution efficiently mimics the normal distribution, and for $\beta > 5$ ⁸, it efficiently mimics the lognormal distribution.

However, before showing the Weibull distribution completely reproduce the used material's strength values, let first present the generalities of a tensile test formulation.

General Tensile Test Formulation

In a tensile test analysis, by defining the engineering stress value as $\sigma = F/A_0$, and the engineering strain value as $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L-L_0}{L_0}$ where F is the applied force, A_0 is the initial area of the tested element, and L_0 is the initial length, and L is the final elongation of the tested element (see figure.1).

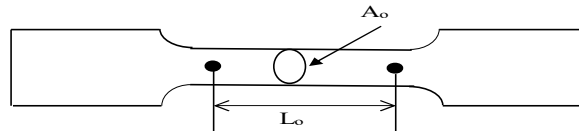


Figure 1. Test Specimen
Source: The Authors

The relationships among the ultimate material's strength S_{ut} , the true stress σ_t , and the true strain ϵ_t values (see figure.2) on which the proposed method is based, are as follows. Based on both F and A_0 , the S_{ut} value is defined as

$$S_{ut} = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

Therefore, based on the S_{ut} and ϵ values the true stress value defined as the instantaneous applied stress, at the S_{ut} coordinate, in terms of the S_{ut} and ϵ values is determined as

$$\sigma_t = S_{ut}(1 - \epsilon) \quad (2)$$

And the true strain value at the S_{ut} coordinate is given as

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon) \quad (3)$$

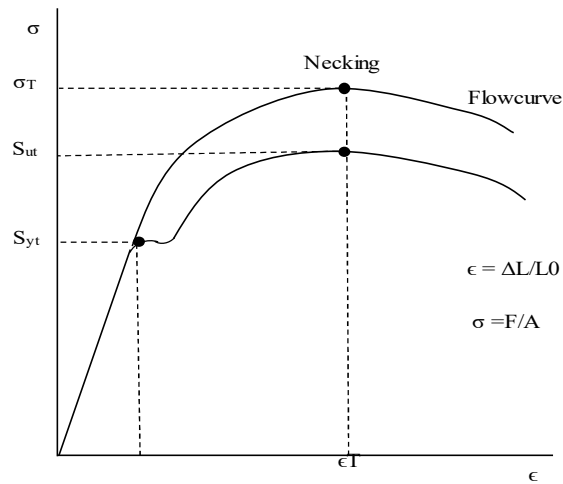


Figure 2. Stress-Strain representation
Source: The Authors

Thus, since now from Eq.(1) the S_{ut} value can be determined, and from Eq.(2), the corresponding σ_t value is given, then now let present how the b value is determined.

Fatigue Slope Formulation

In the analysis, the fatigue slope b value of the S-N curve is the exponent that let us to determine the strength range that corresponds to a desired pair of life cycles values (Barrón-Meza, 2010). The common approach in the S-N analysis consists in determining b in the logarithm range given by $N_1 = 10^3$ and $N_2 = 10^6$ cycles (see figure.3). In this logarithm scale the cycles-strength coordinates to determine b are $[\log(10^3), \log(fS_{ut})]$ and $[\log(10^6), \log(S_e)]$. Where f represents the strength's percentage that the material presents after 10^3 cycles, and S_e represents the corresponding fatigue strength limit.

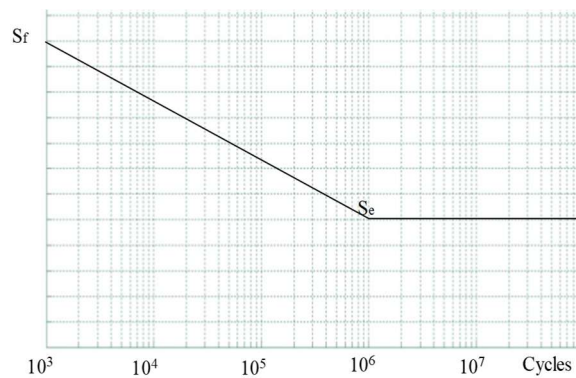


Figure 3. S-N curve representation
Source: The Authors

Hence, since in this logarithm range the S-N curve behavior is linear given as

$$Y_i = a + bX_i \text{ for } i=1,2 \quad (4)$$

Where $Y_1 = \log(fS_{ut})$, $Y_2 = \log(S_e)$, $X_1 = \log(10^3)$ and $X_2 = \log(10^6)$, then the fatigue b and a parameters of the S-N curve are determined as

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{fS_{ut}}{S_e} \right) \quad (5a)$$

$$a = \log \left(\frac{(fS_{ut})^2}{S_e} \right) \quad (5b)$$

Therefore, based on Eqs.(5a and 5b) the relation between the applied stress and its corresponding cycles to failure is given by the Basquin formula given as

$$N_i = \left(\frac{\sigma_{eq}}{a} \right)^{1/b} \quad (5c)$$

However, when S_e is unknown, then the fatigue b value defined in Eq.(5a), based on the σ_t value is given as

$$b = \frac{\log(fS_{ut}/\sigma_t)}{\log(2N)} \quad (6a)$$

Consequently, the cycles to failure defined in Eq.(5c) based on the σ_t value is given as

$$N_i = \frac{1}{2} \log \left(\frac{fS_{ut}}{\sigma_t} \right)^{1/b} \quad (6b)$$

Now that from Eqs.(5a and 6a) we can determine the b value, let present the methodology to determine the strength Weibull β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters directly from the S_f and S_e values.

WEIBULL/TENSILE TEST/RELIABILITY METHODOLOGY

This section is structured to present 1) the steps to determine the strength Weibull β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters directly from the maximum $S_f = (fS_{ut}) = S_{max}$ and the minimum $(S_e) = S_{min}$ tensile strength values. 2) how to use the derived β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters to determine the reliability percentile of the related S-N curve. And 3) how to determine the log-standard deviation σ_x value directly from the β value. Let start given the Weibull's generalities.

3.1 Generalities of the Weibull distribution

For the two parameter Weibull distribution ⁹ given by

$$f(t_i) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t_i}{\eta} \right)^\beta \right\} \quad (7)$$

Where t represents the desired life time, β is the shape parameter and η is the scale parameter. However, since in this paper the life of the element is represented by either its cycles to failure N , or by its material's strength σ value, then by replacing t in Eq.(7) with either N_i or σ_i , the corresponding Weibull reliability function is given as

$$R(N_i \text{ or } \sigma_i) = \exp \left\{ - \left(\frac{N_i}{\eta_{(N)}} \right)^\beta \right\} = \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma_i}{\eta_{(\sigma)}} \right)^\beta \right\} \quad (8)$$

From Eq.(8), notice that 1) although to determine the reliability of the element we can use either N_i or σ_i , the corresponding $\eta_{(N)}$ and $\eta_{(\sigma)}$ values are different ($\eta_{(N)} \neq \eta_{(\sigma)}$). And 2) the $\eta_{(N)}$ and $\eta_{(\sigma)}$ values are related by the life/stress model, as can be the Arrhenius, the inverse power law model and the Basquin equation defined here in Eq.(5c). Also notice that because in Weibull analysis, by supposing the failure mode remains constant, then in the analysis the β value is considered to be constant¹⁰. Consequently, as shown in Eq.(8), in any Weibull analysis, we always have two Weibull families. One representing the cycles to failure $W(\beta, \eta_{(N)})$, and the other representing the material strength $W(\beta, \eta_{(\sigma)})$. Here the analysis is performed based on the $W(\beta, \eta_{(\sigma)})$ family. Now let present the steps to determine the β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters directly from the tensile $S_f = (fS_{ut}) = S_{max}$ and $(S_e) = S_{min}$ values.

Steps to Determine the Weibull Strength Parameters

Step1. From the used material determine the corresponding S_{ut} , σ_t and fatigue slope b values.

Step2. Determine the desired reliability $R(n)$ index to perform the analysis. In practice, it is $R(n)=0.9535$. And it corresponds to test a set of $n=21$ parts¹¹. From¹¹, the relation between $R(n)$ and n is given as

$$R(n) = \exp \left\{ \frac{-1}{n} \right\} \quad (9)$$

Note1. Here observe $R(n)$ is not the reliability of the element, instead $R(n)$ is just the reliability on which the analysis will be performed. $R(n)$ is alike the confidence interval CL used in the quality field.

Step3. By using the n value of step 2 in Eq.(10), compute the Y_i elements¹² and its corresponding arithmetic mean μ_y and standard deviation σ_y values as

$$Y_i = \ln(-(\ln(1 - (i - 0.3)/(n + 0.4)))) \quad (10)$$

Note2. Observe, once n was selected in step 2, the μ_y and σ_y values computed from the Y_i elements defined in Eq.(10) are both constant. For $n=21$ (or $R(n)=0.9535$) they are $\mu_y = -0.54562412$ and $\sigma_y = 1.17511694$. In this paper these two values are used.

Step 4. Based on Eq.(6b), by using $N_1 = 10^3$ and the σ_t and b values of step1, determine the maximum strength S_f value as

$$S_f = \sigma_t(2N_1)^b \quad (11)$$

Note3. Observe that because $S_f = f * S_{ut}$, then from Eq.(11) the f value is directly given as $f = (S_f)/S_{ut}$.

Step 5. If the S_e value is unknown, then based on Eq.(6b), by using $N_2 = 10^6$ and the σ_t and b values of step1 determine the minimum strength S_e value as

$$S_e = \sigma_t(2N_2)^b \quad (12)$$

Step 6. By using the μ_y value from step 3, and the S_f and S_e values, determine the strength Weibull shape parameters as

$$\beta = \frac{-4*\mu_y}{0.99*\ln(S_f/S_e)} \quad (13)$$

Step 7. By using the addressed S_f and S_e values, determine the Weibull scale parameters as

$$\eta_{(\sigma)} = \sqrt[2]{S_f * S_e} \quad (14)$$

The β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters determined in steps 6 and 7 are the parameters of the Weibull strength distribution.

Note4. Notice if f , S_{ut} , and S_e are known then from Eq.(5a) b can be estimated, implying the true stress σ_t value is not necessary. It is to say, as shown in Eqs.(13 and 14), the Weibull strength parameters only depends on the S_f and S_e values.

Now based on the β and $\eta_{(\sigma)}$ parameters let determine the corresponding log-mean μ_x and log-standard σ_x deviation values used to formulate the confidence interval of μ_x .

Steps to Determine the Log-mean and the Log-standard Deviation

The analysis is based on the linear form of the reliability function (Hashemi-Dezaki, Askarian-Abyaneh and Haeri-Khiavi, 2015) defined in Eq.(9) given as

$$Y_i = b_0 + \beta X_i \quad (15)$$

Thus, since from Eq.(15) $X_i = \ln(t_i)$, then we need to determine its log-mean μ_x and its log-standard deviation σ_x values. From ¹ the μ_x value is directly given by the strength scale $\eta_{(\sigma)}$ parameters as

$$\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)}) \quad (16a)$$

And from ¹³, based on both the μ_y value of step 3, and on the addressed β value, the σ_x value is given as

$$\sigma_x = \frac{\sigma_y}{\beta} \quad (16b)$$

Thus, a confidence interval (CL) of μ_x is given as

$$CL = \mu_x \pm Z_{\alpha/2} \sigma_x \quad (17)$$

Where $Z_{\alpha/2}$ is the th desired percentile given by the normal distribution, (which for $CL=0.95$, is $Z_{0.1/2} = 1.644853$).

Unfortunately, although from Eq.(16a) $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$, the CL limits defined in Eq.(17) cannot be used to determine a confidence interval for $\eta_{(\sigma)}$. Consequently, Eq.(17) cannot be used to determine the reliability percentiles of the S-N curve neither. This fact occurs because there is not a direct relationship between CL and $R(t)$. CL represents a instantaneous probability that the strength of n identical components behaves around μ_x , and $R(t)$ represents the probability that a observed (measured) μ_x value stay around this value through the time. It is to say, while the CL value depends only on the lack of homogeny of the material, the $R(t)$ index depends also on the applied stress, the desired time t , and on the observed μ_x value. Thus, Eq.(17) should not be used to determine the S-N percentiles that represents the desired $R(t)$ index. Numerically, the deficiency of using CL in reliability analysis is given in section 4.2.

Here notice that in contrast to Eq.(17), in reliability analysis we are interested *only in the upper limit*. Consequently, since from Eq.(8) the $R(t)$ index depends only on the $\eta_{(\sigma)}$ value, then because $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$, in the analysis μ_x is the lower allowed value that we can used to design the element. Therefore, as shown in ¹⁴ if $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$ is going to be monitored in a process, then in the monitoring control chart the μ_x value must be set us the lower allowed value.

Now based on the addressed μ_x and σ_x values, let present the formulation to determine the reliability percentile of the related S-N curve.

Reliability Percentiles for the S-N Curve

The efficiency of the proposed method is based on the following two facts.

1) Since from Eq.(14), $\eta_{(\sigma)}$ is given as the square root of the product of S_f , and S_e , then in logarithm scale $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$ is the average between S_f and S_e , implying that $\ln(S_f) - \ln(\eta_{(\sigma)}) = \ln(\eta_{(\sigma)}) - \ln(S_e)$ or equivalently that the relation given in Eq.(18) always holds

$$\ln(S_f/\eta_{(\sigma)}) = \ln(\eta_{(\sigma)}/S_e) \quad (18)$$

2) Because in logarithm scale the three values, $\ln(S_f)$, $\ln(\eta_{(\sigma)})$ and $\ln(S_e)$, all are in the same S-N line, then this line represents the lower th-reliability percentile for which it is expected the product present the desired $R(t)$ index. Consequently, from Eq.(18) and Eq.(8), we have that the following reliability relationship always holds

$$R(\sigma) = \exp\left\{-\left(\frac{\eta_{(\sigma)}}{\eta_{\sigma Ni}}\right)^\beta\right\} = \exp\left\{-\left(\frac{S_{fi}}{S_f}\right)^\beta\right\} = \exp\left\{-\left(\frac{S_{ei}}{S_e}\right)^\beta\right\} \quad (19)$$

Eq.(19) implies that in practice, *the derived reliability percentiles of the S-N curve can also be used as the minimum strength $\eta_{(\sigma i)}$ value that the used material must present to have the desired reliability.* Now based on the above two facts, the steps to determine the reliability percentiles of the S-N curve are as follows.

Steps to Determine the Reliability Percentiles for the S-N Curve

Step1. Determine the Y_i element that corresponds to the desired upper reliability percentile of the S-N curve as

$$Y_{ui} = \ln(-(\ln(R(t_{ui}))) \quad (20a)$$

Step2. Determine the Y_i element that corresponds to the desired lower reliability percentile of the S-N curve as

$$Y_{Li} = \ln(-(\ln(1 - R(t_{Li}))) \quad (20b)$$

Step3. By using the Y_{ui} value of step1, determine the upper values of S_f , $\eta_{(\sigma)}$, and S_e that corresponds to the upper reliability percentile of the S-N curve as

$$S_{fu} = \frac{S_f}{\exp\{Y_{ui}/\beta\}}; \eta_{(\sigma u)} = \frac{\eta_{(\sigma)}}{\exp\{Y_{ui}/\beta\}}; S_{eu} = \frac{S_e}{\exp\{Y_{ui}/\beta\}} \quad (21)$$

Step4. By using the Y_{Li} value of step 2, determine the lower value of S_f , $\eta_{(\sigma)}$, and S_e that corresponds to the lower reliability percentile of the S-N curve as

$$S_{fL} = \frac{S_f}{\exp\{Y_{Li}/\beta\}}; \eta_{(\sigma L)} = \frac{\eta_{(\sigma)}}{\exp\{Y_{Li}/\beta\}}; S_{eL} = \frac{S_e}{\exp\{Y_{Li}/\beta\}} \quad (22)$$

Step 5. Plot the upper and lower reliability percentiles.

Now let present the numerical application.

Numerical Application

As an application let used data given in the first row of Table A-23 of the Shigly's book. The material is the steel grade (a) A538A (b). For these material, the Weibull strength parameters of section 3.2 are as follows.

Weibull Strength Parameters

Step1. The corresponding strength data are $S_{ut} = 1515MPa$, $\sigma_t = 1655MPa$ and fatigue slope $b = -0.065$.

Step2. Suppose $R(n) = 0.9535$ is desired.

Step3. The Y_i elements are given in Table 1. From these data $\mu_y = -0.54562412$ and $\sigma_y = 1.17511694$.

Step4. The maximum strength is $S_f = 1655(2 * 1000)^{-0.065} = 1009.79MPa$.

Step5. The minimum strength is $S_e = 1655(2 * 1000,000)^{-0.065} = 644.51MPa$.

Step6. The Weibull shape parameter is $\beta = \frac{-4 * (-0.54562412)}{0.99 * \ln(1009.79/644.51)} = 4.909848$.

Step7. The Weibull scale parameter is $\eta_{(\sigma)} = \sqrt[2]{1009.79 * 644.51} = 806.7353MPa$.

Therefore the Weibull strength distribution to the steel grade (a) A538A (b) material is $W(4.909848, 806.7353MPa)$.

Now based on these parameters let determine the corresponding log-mean μ_x and log-standard deviation σ_x values mentioned in section 3.3.

Table I. Elements of vector Y by using Eq.(10)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Y_i	-3.403483	-2.491662	-2.003463	-1.6616459	-1.3943983	-1.1720537	-0.9793812	-0.807447	-0.6504921	-0.50450882	-0.366512921
n	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Y_i	-0.234122	-0.105285	0.0219284	0.1495258	0.279845	0.4159621	0.56250196	0.7276158	0.92931067	1.22965981	$\mu_y = -0.54562412$ $\sigma_y = 1.17511694$

Source: The Authors

Log-mean and Log-standard Deviation

From Eq.(16a), the log-mean is $\mu_x = \ln(806.7353) = 6.692995$ and from Eq.(16b) the log-standard deviation is $\sigma_x = \frac{1.17511694}{4.909848} = 0.239338$, (observe both μ_x and σ_x were determined without any observed failure time data). Therefore, from Eq.(17), the 95% confidence interval for μ_x is $CL = 6.692995 \pm 1.644853 * 0.239338$; $[6.299319 \leq \mu_x \leq 7.086673]$ or equivalently because from Eq.(16a) $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$, then by taking the exponential, the 95% confidence interval for $\eta_{(\sigma)}$ is $[544.2009MPa \leq \eta_{(\sigma)} \leq 1195.9219MPa]$, unfortunately as shown next, this confidence interval should not be used in reliability analysis.

For example, notice that although under probabilistic point of view we can say with a confidence level of 95% the lower expected value of the Weibull scale parameter is $\eta_{(\sigma L)} = 544.2009MPa$, and then it should be monitored in the production process in logarithm scale as in figure 4 and/or in natural scale as in figure 5

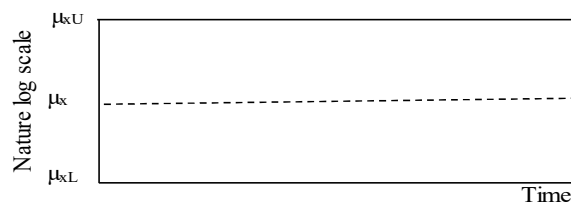


Figure 4. Control Chart for μ_x (logarithm Scale)

Source: The Authors

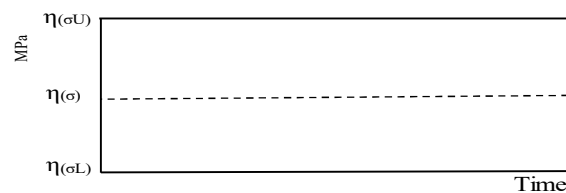


Figure 5. Control Chart for the Weibull scale parameter

Source: The Authors

Unfortunately, as mentioned above in reliability, monitoring (or using) the lower limit of $\eta_{(\sigma)}$ is *not correct* because in reliability the addressed $\eta_{(\sigma)}$ value (or nominal μ_x value) is the lower allowed value. Thus, in the monitoring process, the $\eta_{(\sigma)}$ value (or equivalently the μ_x value) is the one that must be set as the lower allowed limit in the control chart (see figure.6 and figure.7).

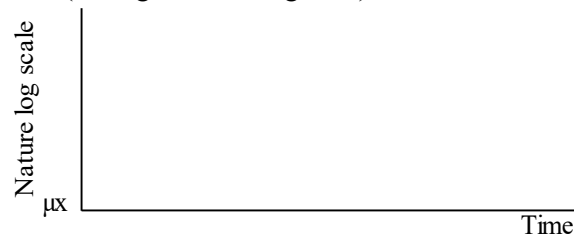


Figure 6. Control Chart for μ_x (logarithm Scale)
Source: The Authors



Figure 7. Control Chart for the Weibull scale parameter
Source: The Authors

Additionally it is shown that although by using the *CL* limits defined in Eq.(17), the 95% confidence for the S-N curve plotted in figure 8 is possible, they do not the 95% reliability confidence interval for the S-N curve. Consequently, because the *CL* confidence interval is not a reliability percentile, then by using the *CL* values in Eq.(19), the estimated reliability is not the desired $R(t)=0.95$ index.

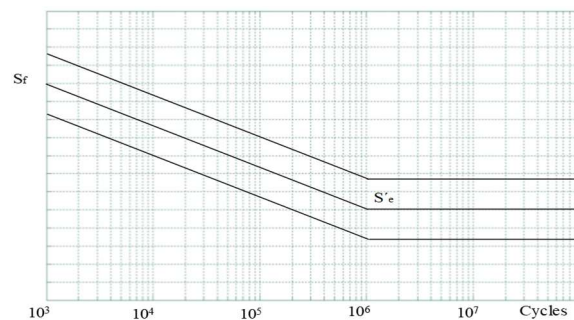


Figure 8. Probabilistic Percentiles for the S-N curve
Source: The Authors

Seeing this observe that by using the upper and lower limits of *CL* to determine $R(\sigma)$, the demonstrated reliability is not the desired one. For the upper level $\eta_{(\sigma U)} = 1195.9219 \text{ MPa}$, then with $\eta_{(\sigma)} = 806.7356 \text{ MPa}$ in Eq.(19), the estimated reliability instead of be $R(\sigma) = 0.95$ is only $R(\sigma_U) = \exp\left\{-\left(\frac{806.7356}{1195.9219}\right)^{4.909848}\right\} = 0.8653$.

Similarly, if we use the lower confidence level $\eta_{(\sigma U)} = 544.2009 \text{ MPa}$ with $\eta_{(\sigma)} = 806.7356 \text{ MPa}$ in Eq.(19), the estimated reliability index instead of be $R(\sigma) = 0.95$, also is only of $R(\sigma_L) = \exp\left\{-\left(\frac{544.2009}{806.7356}\right)^{4.909848}\right\} = 0.8653$.

Therefore, the general conclusion is that by using the *CL* limits in reliability analysis we sub-estimate the real $R(\sigma)$ index ($0.8653 < 0.95$) of the element, and consequently the *CL* limits should not be used in the reliability analysis.

Now we know the *CL* values should not be used, let determine the reliability percentiles for the S-N curve that we can use in any reliability analysis. Following section 3.4.1, the analysis is as follows.

Reliability Percentiles for the S-N Curve

The reliability percentile analysis for the S-N curve is as follows

Step1. From Eq.(20a) the upper Y_i element for $R(t)=0.95$ is $Y_{ui} = \ln(-(\ln(0.95))) = -2.970195249$.

Step2. From Eq.(20b) the lower Y_i element for $R(t)=0.05$ is $Y_{Li} = \ln(-(\ln(1 - 0.95))) = 1.0971887$.

Step3. From Eq.(21) the upper strength values are

$$S_{fu} = \frac{1009.79 \text{ MPa}}{\text{Exp}\{-2.970195249/4.909848\}} = 1849.08 \text{ MPa}.$$

$$\eta_{(\sigma u)} = \frac{806.7353 \text{ MPa}}{\text{Exp}\{-2.970195249/4.909848\}} = 1477.26 \text{ MPa} \quad \text{and} \quad S_{eu} = \frac{644.51 \text{ MPa}}{\text{Exp}\{-2.970195249/4.909848\}} = 1180.20 \text{ MPa}.$$

Step4. From Eq.(22) the lower strength values are

$$S_{fL} = \frac{1009.79 \text{ MPa}}{\text{Exp}\{1.0971887/4.909848\}} = 807.57 \text{ MPa},$$

$$\eta_{(\sigma L)} = \frac{806.7353 \text{ MPa}}{\text{Exp}\{1.0971887/4.909848\}} = 645.18 \text{ MPa} \text{ and}$$

$$S_{eL} = \frac{644.51 \text{ MPa}}{\text{Exp}\{1.0971887/4.909848\}} = 515.44 \text{ MPa}.$$

From the above data, notice because the Y_{ui} value was determined by using $R(\sigma) = 0.95$, then by using the S_{fu} , $\eta_{(\sigma u)}$ and S_{eu} values in Eq.(19), the reliability percentile is always $R(\sigma) = 0.95$.

$$\text{For } R(\sigma/S_f, S_{fu}) = \exp\left\{-\left(\frac{1009.79}{1849.08}\right)^{4.909848}\right\} = 0.95, \quad R(\sigma/\eta_{(\sigma)}, \eta_{(\sigma u)}) = \exp\left\{-\left(\frac{806.7356}{1477.26}\right)^{4.909848}\right\} = 0.95, \text{ and } R(\sigma/S_e, S_{eu}) = \exp\left\{-\left(\frac{644.51}{1180.20}\right)^{4.909848}\right\} = 0.95.$$

Similarly, since the Y_{Li} value was determined by using $R(\sigma) = 0.05$, then by using the S_{fL} , $\eta_{(\sigma L)}$ and S_{eL} values in Eq.(19), the reliability percentile in all cases is always $R(\sigma) = 0.05$.

$$\text{For } R(\sigma/S_f, S_{fL}) = \exp\left\{-\left(\frac{1009.79}{807.57}\right)^{4.909848}\right\} = 0.05, \quad R(\sigma/\eta_{(\sigma)}, \eta_{(\sigma L)}) = \exp\left\{-\left(\frac{806.7356}{645.18}\right)^{4.909848}\right\} = 0.05 \text{ and } R(\sigma/S_e, S_{eL}) = \exp\left\{-\left(\frac{644.51}{515.44}\right)^{4.909848}\right\} = 0.05.$$

The corresponding percentiles of the S-N curve in MPa and in logarithm scale are all given in Table II.

Table II. Reliability Percentiles for the S-N curve of the A538A (b) steel

Percentiles in Mpa Values				Percentiles in logarithm scale		
Limits	Sf	$\eta(\sigma)$	Se	$\ln(Sf)$	$\ln(\eta(\sigma))$	$\ln(Se)$
Upper	1849.08	1477.26	1180.20	7.5224	7.2979	7.0734
Mean	1009.79	806.74	644.51	6.9175	6.6930	6.4685
Lower	807.57	645.18	515.44	6.6940	6.4695	6.2450

Source: The Authors

Here it is very important to notice from either Table II or Figure 9 that data in MPa do not fall in a right line with the $\eta_{(\sigma)}$ value.

In contrast observe from figure. 10 that in logarithm scale they are in line with the $\eta_{(\sigma)}$ value. Also notice from figure 9 and figure.10 that the upper and lower percentiles are not symmetric around the $\eta_{(\sigma)}$ value, and that this fact is due to in Weibull analysis, the $\eta_{(\sigma)}$ does not represent the 0.50 percentile, instead it represents the 0.6321 failure percentile, implying the limits around the $\eta_{(\sigma)}$ value never will be symmetric around the $\eta_{(\sigma)}$ value.

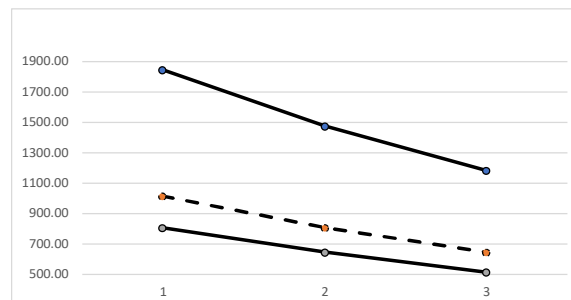


Figure 9. S-N curve in MPa values

Source: The Authors

Additionally, remember that as shown in Eq.(18), the symmetrical behavior around $\eta_{(\sigma)}$ occurs only for the S_f and S_e values from which the $\eta_{(\sigma)}$ value was determined. In order to clarify the mentioned facts, in Table 3 the Weibull analysis for the expected values of $\eta_{(\sigma)}$ are given.

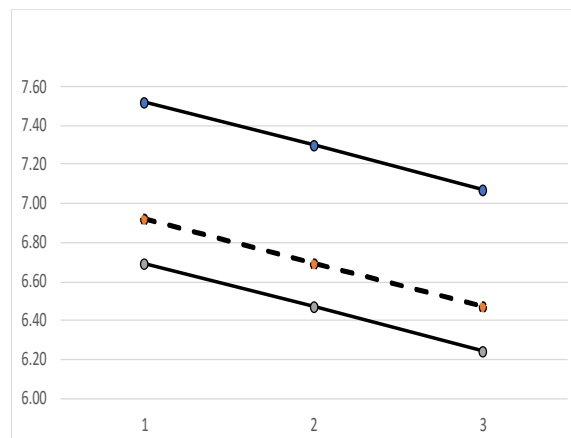


Figure 9. S-N curve in logarithm scale

Source: The Authors

Table 3. Weibull Scale Analysis

n	Y_i	Y_{ui}	σ_i	$\eta(\sigma_i)$	$R(t)$
1	-3.4035	0.5000	403.35	1613.55	0.9673
	-2.9702	0.5461	440.56	1477.26	0.9500
2	-2.4917	0.6020	485.66	1340.07	0.9206
3	-2.0035	0.6649	536.44	1213.23	0.8738
4	-1.6616	0.7129	575.11	1131.64	0.8271
5	-1.3944	0.7528	607.28	1071.69	0.7804
6	-1.1721	0.7876	635.42	1024.24	0.7336
	-1.1023	0.7989	644.51	1009.79	0.7174
7	-0.9794	0.8192	660.85	984.83	0.6869
8	-0.8074	0.8484	684.40	950.94	0.6402
9	-0.6505	0.8759	706.63	921.02	0.5935
10	-0.5045	0.9023	727.96	894.04	0.5467
11	-0.3665	0.9281	748.71	869.26	0.5000
12	-0.2341	0.9534	769.17	846.14	0.4533
13	-0.1053	0.9788	789.62	824.22	0.4065
	0.0000	1.0000	806.735	806.735	0.3679
14	0.0219	1.0045	810.35	803.14	0.3598
15	0.1495	1.0309	831.68	782.54	0.3131
16	0.2798	1.0587	854.05	762.04	0.2664
17	0.4160	1.0884	878.06	741.20	0.2196
18	0.5625	1.1214	904.66	719.41	0.1729
19	0.7276	1.1597	935.60	695.62	0.1262
20	0.9293	1.2084	974.84	667.62	0.0794
	1.0972	1.2504	1008.74	645.18	0.0500
	1.1023	1.2517	1009.79	644.51	0.0492
21	1.2297	1.2846	1036.33	628.00	0.0327

Source: The Authors

The practical interpretation of data given in Table III is as follows.

1. The values of the column σ_i in Table III represent the maximum applied stress values for which a product that has the $\eta(\sigma)$ strength value, will present the reliability $R(t)$ index given in the row of Table III that corresponds to the selected σ_i value. For example, if a component (material) with strength of $\eta(\sigma) = 806.7353 \text{ MPa}$, is subjected to constant stress of $\sigma = 403.35 \text{ MPa}$, then as shown in Table 3, it is expected the element will present a minimum reliability of $\exp\left\{-\left(\frac{403.35}{806.7353}\right)^{4.909848}\right\} = 0.9673$. In Table III, by using the Y_i value defined in Eq.(10), the corresponding σ_i value was determined as

$$\sigma_i = \eta(\sigma) * \exp\{Y_i/\beta\} \quad (23)$$

2. The values of the column $\eta(\sigma_i)$ in Table III, represent the strength value that a product should have to present the given reliability $R(t)$ index when the applied stress is constant at the $\eta(\sigma)$ value. For example, the $\eta(\sigma_i) = 1613.55 \text{ MPa}$ value given in the first row of Table III, represents the minimum strength value that a product (material) must have to presents a reliability of $R(t) = 0.9673$ when the maximum applied stress is constant at the value of $\eta(\sigma) = 806.7353 \text{ MPa}$. It is to say $R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{806.7353}{1613.55}\right)^{4.909848}\right\} = 0.9673$. In Table 3, the $\eta(\sigma_i)$ value was determined as

$$\eta_{(\sigma i)} = \eta_{(\sigma)} / \exp\{Y_i / \beta\} \quad (24)$$

From Table 3 also notice the rows where the Weibull analysis reproduce the $S_f = 1009.79 \text{ MPa}$ and $S_e = 644.51 \text{ MPa}$ values, as well as the upper 95% and lower 5% percentiles of $\eta_{(\sigma)}$ were also added. Also from Table 3, notice that as shown in Fig.9 and in Fig.10 the behavior around the $\eta_{(\sigma)}$ value is not symmetrical. Now let determine the reliability of a component by using the stress/strength analysis.

STRESS/STRENGTH ANALYSIS

Since all mechanical element is subjected to an applied stress and it has an inherent strength to overcome the applied stress, then because both the stress and the strength are random variable, the element's reliability must be determined based on the distribution that represent the applied stress, and on the distribution that represent the inherent strength. Therefore, the right reliability function to be used in the analysis of a mechanical element is the composed reliability function known as a stress/strength reliability function [15]. In this stress/strength approach any pair of combination of stress and strength functions is possible. However, the most common combinations are the normal/normal, the log-normal/log-normal, the Weibull/Weibull and any pair of combination among these three distributions [16]. But because here the analysis is a stress based analysis which is efficiently modeled by the Weibull distribution, then the Weibull/Weibull approach is used as follows.

Numerical Analysis

In this section, *the strength Weibull distribution* data addressed in section 4.1 of the steel grade (a) A538A (b) material is used. From this section the addressed Weibull strength family is W ($\beta=4.909848$, $\eta_{(\sigma)}=806.7353 \text{ MPa}$). Therefore, to apply the stress/strength analysis the corresponding stress Weibull distribution must be addressed. Doing this, suppose from an application the maximum principal applied stress is $\sigma_1 = 600 \text{ MPa}$ and the minimum principal applied stress that generates a failure is $\sigma_2 = 380 \text{ MPa}$. (σ_1 and σ_2 are the principal stresses given by the Mohr circle analysis). Thus, with these two principal stress values, from Eq.(14) the scale Weibull stress parameter is $\eta_s = \sqrt[3]{600 * 380} = 447.4935 \text{ MPa}$, and from Eq.(13) $\beta=4.909848$. Thus, the Weibull stress distribution is $Ws(\beta=4.909848, \eta_s=447.4935 \text{ MPa})$. Consequently, from the Weibull/Weibull stress/strength reliability function [1] given as

$$R(t/\eta_s, \eta_{(\sigma i)}) = \frac{\eta_{(\sigma i)}^\beta}{\eta_{(\sigma i)}^\beta + \eta_s^\beta} \quad (25)$$

Therefore, the reliability of the designed component is

$$R(t, \eta_s, \eta_{(\sigma i)}) = \frac{806.7353^{4.909848}}{806.7353^{4.909848} + 447.4935^{4.909848}} = 0.9292.$$

Finally, it is important to observe because the reliability index given in Table III and that given from Eq.(25) tends to be the same for high reliability indices, (say a reliability above 0.90), then the reliability of an element can be determined directly by using the Weibull strength parameters as in Table 3, or by using the stress and strength distributions in Eq.(25).

Seeing this numerically, suppose that in an application the used material is subjected to reversible stress with Weibull stress parameter $\eta_s=403.35 \text{ MPa}$. Therefore, from Eq.(25), *as shown in Table III*, the estimated reliability is

$$R(t, \eta_s, \eta_{(\sigma i)}) = \frac{806.7353^{4.909848}}{806.7353^{4.909848} + 403.35^{4.909848}}$$

Similarly, if the applied stress is $\eta_s=536.44\text{MPa}$, then it is $R(t, \eta_s, \eta_{(\sigma i)}) = \frac{806.7353^{4.909848}}{806.7353^{4.909848} + 536.44^{4.909848}} = 0.8811$. For detail of the given formulation see [1].

Consequently, for high reliability indices, the σi column of any **Weibull Strength** analysis can be used as the maximum allowed constant stress value that we can apply, in order the component presents the desired reliability. Similarly, the $\eta_{(\sigma i)}$ column of any **Weibull Strength** analysis can be used as the minimum allowed strength value that the used material must present, in order the designed element present the desired reliability when it is subjected to a maximum stress value represented by the strength scale $\eta_{(\sigma)}$ value. Now by using the proposed Weibull/S-N methodology, the Weibull parameters, the log-mean and log-standard deviation parameters and the 0.95 and 0.05 reliability percentiles of each one of the steel materials given in Table A-23 of the Shigly's book are all given in Table IV.

WEIBULL/S-N ANALYSIS FOR MATERIALS GIVEN IN TABLE A-23 OF THE SHIGLY'S BOOK

The analysis is presented in Table IV.

CONCLUSIONS

1. Although the relation $\mu_x = \ln(\eta_{(\sigma)})$ holds, the confidence interval *CL* limits of a S-N curve defined in Eq.(17), should not be used to perform a reliability analysis. They sub-estimate the reliability index.
2. From Eqs.(21 and 22) the upper and lower S_f , $\eta_{(\sigma)}$, and S_e values to determine any desired reliability percentile for a S-N curve are given by using only the corresponding $Y_{L,ui}$ and β values.
3. Observe that although here the Weibull strength parameters were both determined for $N_1 = 10^3$ and $N_2 = 10^6$, any other desired values between these two values can be used.
4. As shown in Table 3, the lower reliability percentiles of the S-N curve are the minimum strength values given in the column $\eta_{(\sigma i)}$ of Table 5. Due to the column $\eta_{(\sigma i)}$ of Table 3 represents the minimum strength values that the designed element must have to present the desired reliability, then the reliability percentiles of the S-N curve can be used as the accelerated levels in and ALT test to demonstrate the product presents the intended reliability¹⁷.
5. Although the Weibull analysis performed in Table III is for constant stress values, and that given by the stress/strength methodology is for variable stress behavior, for high reliability = 0.9678. indices, the estimated reliability indices are both similar [18] [$R(\sigma) \cong R(t, \eta_s, \eta_{(\sigma i)})$]. Formal formulation why this fact occurs is actually an open issue on which more research must be undertaken.

Table IV. Weibull Strength Parameters, Log-Parameters and Reliability Percentiles for Tensile Test Data given in Table A-23 of the Shiglys book

Steel Grade	Ultimate Strength (MPa)	True Stress (MPa)	Fatigue Exponent b	Strength at N1=10 ³ Sf	Strength at N2=10 ⁶ Se	Weibull Parameters		Log-Parameters		Reliability Percentiles for the S-N Curve					
						Shape β	Scale $\eta(\sigma)$	Mean μ_x	Stdev σ_x	R(0.95), Y _u =-2.970195249			R(0.05), Y _L =1.0971887		
										Sf	$\eta(\sigma)$	Se	Sf	$\eta(\sigma)$	Se
A538A (b)	1515	1655	-0.065	1009.79	644.51	4.909848	806.7353	6.6930	0.23934	1849.08	1477.26	1180.20	807.57	645.18	515.44
A538B (b)	1860	2135	-0.071	1244.59	762.12	4.494931	973.9233	6.8813	0.26143	2409.91	1885.82	1475.71	975.03	762.98	597.06
A538C (b)	2000	2240	-0.070	1315.76	811.29	4.559144	1033.1798	6.9404	0.25775	2524.12	1982.03	1556.36	1034.33	812.19	637.76
AM-350 (c)	1315	2800	-0.140	966.08	367.29	2.279572	595.6811	6.3897	0.51550	3555.35	2192.21	1351.71	597.01	368.11	226.98
AM-350 (c)	1905	2690	-0.102	1238.93	612.42	3.128824	871.0582	6.7697	0.37558	3201.28	2250.73	1582.43	872.47	613.41	431.27
Gainex (c)	530	805	-0.070	472.85	291.56	4.559144	371.2990	5.9170	0.25775	907.11	712.29	559.32	371.71	291.88	229.20
Gainex (c)	510	805	-0.071	469.27	287.36	4.494931	367.2170	5.9060	0.26143	908.66	711.05	556.42	367.63	287.68	225.12
H-11	2585	3170	-0.077	1765.55	1037.24	4.144676	1353.2559	7.2103	0.28352	3615.00	2770.82	2123.77	1354.92	1038.51	796.00
RQC-100 (c)	940	1240	-0.070	728.37	449.11	4.559144	571.9388	6.3490	0.25775	1397.28	1097.20	861.56	572.58	449.61	353.05
RQC-100 (c)	930	1240	-0.070	728.37	449.11	4.559144	571.9388	6.3490	0.25775	1397.28	1097.20	861.56	572.58	449.61	353.05
10B62	1640	1780	-0.067	1069.67	673.37	4.763285	848.6937	6.7437	0.24670	1995.54	1583.29	1256.20	849.60	674.08	534.83
1005-1009	360	580	-0.090	292.64	157.16	3.546001	214.4546	5.3681	0.33139	676.25	495.57	363.17	214.76	157.38	115.33
1005-1009	470	515	-0.059	328.89	218.80	5.409154	268.2541	5.5919	0.21725	569.53	464.54	378.90	268.51	219.01	178.63
1005-1009	415	540	-0.073	310.04	187.25	4.371782	240.9454	5.4846	0.26880	611.62	475.31	369.38	241.23	187.47	145.69
1005-1009	345	640	-0.109	279.49	131.63	2.927891	191.8084	5.2565	0.40135	770.79	528.98	363.03	192.14	131.86	90.49
1015	415	825	-0.110	357.55	167.24	2.901273	244.5348	5.4994	0.40503	995.30	680.69	465.53	244.96	167.53	114.58
1020	440	895	-0.120	359.50	156.93	2.659501	237.5196	5.4703	0.44186	1098.32	725.65	479.44	237.97	157.23	103.88
1040	620	1540	-0.140	531.34	202.01	2.279572	327.6246	5.7919	0.51550	1955.45	1205.72	743.44	328.36	202.46	124.84
1045	725	1225	-0.095	595.03	308.70	3.359369	428.5862	6.0605	0.34980	1440.53	1037.58	747.34	429.24	309.17	222.69
1045	1450	1860	-0.073	1067.92	644.97	4.371782	829.9229	6.7213	0.26880	2106.68	1637.19	1272.32	830.89	645.72	501.81
1045	1345	1585	-0.074	903.14	541.69	4.312704	699.4441	6.5503	0.27248	1798.27	1392.69	1078.59	700.27	542.33	420.01
1045	1585	1795	-0.070	1054.37	650.12	4.559144	827.9276	6.7189	0.25775	2022.68	1588.28	1247.17	828.85	650.84	511.07
1045	1825	2275	-0.080	1238.51	712.69	3.989251	939.5048	6.8454	0.29457	2607.67	1978.12	1500.56	940.70	713.60	541.32
1045	2240	2275	-0.081	1229.13	702.42	3.940001	929.1759	6.8343	0.29825	2612.12	1974.67	1492.77	930.38	703.33	531.69
1144	930	1000	-0.080	544.40	313.27	3.989251	412.9691	6.0234	0.29457	1146.23	869.50	659.59	413.50	313.67	237.94
1144	1035	1585	-0.090	799.72	429.47	3.546001	586.0525	6.3734	0.33139	1848.03	1354.28	992.45	586.89	430.09	315.18
1541F	950	1275	-0.076	715.54	423.28	4.199212	550.3410	6.3105	0.27984	1451.50	1116.40	858.65	551.01	423.80	325.95
1541F	890	1275	-0.071	743.25	455.13	4.494931	581.6169	6.3658	0.26143	1439.17	1126.19	881.28	582.27	455.65	356.56
4130	895	1275	-0.083	678.46	382.41	3.845061	509.3598	6.2332	0.30562	1468.94	1102.82	827.95	510.03	382.91	287.47
4130	1425	1695	-0.081	915.77	523.34	3.940001	692.2871	6.5400	0.29825	1946.18	1471.23	1112.20	693.18	524.02	396.14
4140	1075	1825	-0.080	993.53	571.72	3.989251	753.6687	6.6250	0.29457	2091.87	1586.84	1203.74	754.63	572.44	434.24
4142	1060	1450	-0.100	678.06	339.83	3.191401	480.0262	6.1738	0.36821	1719.72	1217.47	861.90	480.79	340.37	240.97
4142	1250	1250	-0.080	680.50	391.59	3.989251	516.2114	6.2465	0.29457	1432.79	1086.88	824.48	516.87	392.09	297.43
4142	1415	1825	-0.080	993.53	571.72	3.989251	753.6687	6.6250	0.29457	2091.87	1586.84	1203.74	754.63	572.44	434.24
4142	1550	1895	-0.090	956.13	513.47	3.546001	700.6748	6.5520	0.33139	2209.48	1619.16	1186.56	701.68	514.21	376.82
4142	1760	2000	-0.080	1088.80	626.54	3.989251	825.9382	6.7165	0.29457	2292.46	1739.01	1319.17	826.99	627.34	475.88
4142	2035	2070	-0.082	1109.91	629.92	3.891952	836.1532	6.7288	0.30194	2380.80	1793.59	1351.21	837.25	630.74	475.17
4142	1930	2105	-0.090	1062.09	570.37	3.546001	778.3221	6.6571	0.33139	2454.33	1798.59	1318.05	779.44	571.19	418.58
4142	1930	2170	-0.081	1172.40	670.00	3.940001	886.2909	6.7870	0.29825	2491.56	1883.53	1423.88	887.43	670.87	507.15
4142	2240	1655	-0.089	841.41	454.99	3.585844	618.7373	6.4277	0.32771	1926.36	1416.57	1041.69	619.61	455.64	335.06
4340	825	1200	-0.095	582.89	302.40	3.359369	419.8396	6.0399	0.34980	1411.13	1016.40	732.09	420.48	302.86	218.14
4340	1470	2000	-0.091	1001.47	534.12	3.507034	731.3685	6.5949	0.33507	2335.88	1705.89	1245.81	732.43	534.89	390.63
4340	1240	1655	-0.076	928.79	549.44	4.199212	714.3642	6.5714	0.27984	1884.11	1449.12	1114.57	715.23	550.10	423.10
5160	1670	1930	-0.071	1125.08	688.94	4.494931	880.4084	6.7804	0.26143	2178.52	1704.75	1334.01	881.40	689.72	539.73
52100	2015	2585	-0.090	1304.27	700.43	3.546001	955.8018	6.8626	0.33139	3013.98	2208.72	1618.60	957.17	701.44	514.03
9262	925	1040	-0.071	606.26	371.24	4.494931	474.4169	6.1621	0.26143	1173.92	918.62	718.85	474.95	371.66	290.84
9262	1000	1220	-0.073	700.46	423.04	4.371782	544.3580	6.2996	0.26880	1381.80	1073.85	834.54	544.99	423.54	329.15
9262	565	1855	-0.057	1202.78	811.31	5.598949	987.8368	6.8955	0.20988	2044.44	1679.09	1379.03	988.73	812.04	666.93
9050C (d)	565	1170	-0.120	469.96	205.15	2.659501	310.5005	5.7382	0.44186	1435.80	948.62	626.75	311.09	205.54	135.80
9050C (d)	565	970	-0.110	420.40	196.63	2.901273	287.5136	5.6613	0.40503	1170.23	800.33	547.36	288.02	196.98	134.72
9050X (d)	440	625	-0.075	353.43	210.52	4.255201	272.7739	5.6086	0.27616	710.31	548.21	423.10	273.10	210.78	162.68
9050X (d)	530	1005	-0.100	469.96	235.54	3.191401	332.7078	5.8073	0.36821	1191.94	843.83	597.39	333.24	235.91	167.01
9050X (d)	695	1055	-0.08	574.34	330.50	3.989251	435.6824	6.0769	0.29457	1209.27	917.33	695.86	436.24	330.92	251.03

REFERENCES

1. Piña-Monarez, M. R. Weibull Stress Distribution for Static Mechanical Stress and its Stress/strength Analysis. *Qual Reliab Engng Int.* 2018;34:229–244. <https://doi.org/10.1002/qre.18-0532>.
2. Budynas, R., & Nisbett, J. Shigley's Mechanical Engineering Design (Tenth edition). New York: McGraw Hill 2015. ISBN: 13-978-0-07-339820-4.
3. Gao J. An Z. and Liu B. A new method for obtaining P-S-N curves under the condition of small sample. *Proc IMechE, Part O: J Risk and Reliability* 2017. 231(2):130-137. DOI: DOI: 10.1177/1748006X16686896.
4. Rao K. B., Anoop M.B., Rahava G. Prakash M. and Rajadurai A. Probabilistic fatigue life analysis of welded steel plate railway bridge girders using S-N curve approach. *Proc IMechE, Part O: J Risk and Reliability* 2013;227(4):385-404. DOI: 10.1177/1748006X13480754.
5. Kececioglu DB. Robust Engineering Design-By-Reliability with Emphasis on Mechanical Components and Structural Reliability. Pennsylvania: DEStech Publications Inc. 2003. ISBN:1-932078-07-X.
6. Schmid S. R., Hanrock B. J. and Jacobson B. O. Fundamentals of Machine Elements SI Version, Third Edition. CRC Press, Taylor and Francis Group Boca Raton FL 33487-2742. U.S. A. 2014. ISBN:13:978-1-4822-4750-3.
7. Eric S.Lindquist. Strength of materials and the Weibull distribution. *Probabilistic Engineering Mechanics* 1994;9(3):191-194. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0266-8920(94)90004-3)
8. Rinne, H. The Weibull distribution a handbook, CRC press, Boca Ratón, FL, USA, 2009. ISBN: 13-978-1-4200-8743-7.
9. Weibull W. A statistical theory of the strength of materials. *Proceedings, R Swedish Inst Eng Res* 1939; 151: 45.
10. Jiang R. A novel parameter estimation method for the Weibull distribution on heavily censored data. *Proc IMechE, Part O: J Risk and Reliability* 2019. 1-10. DOI: 10.1177/1748006X19887648.
11. Piña-Monarez MR. Weibull Analysis for Normal/Accelerated and Fatigue Random Vibration Test. *Qual Reliab Engng Int.* 2019;35(7). 2408-2428. <https://doi.org/10.1002/qre.2532>.
12. Mischke C R. A distribution-independent plotting rule for ordered failures. *Journal of Mechanical Design* 1979;104: 593-597. <https://doi.org/10.1115/1.3256391>.
13. Piña-Monarez MR, Ortiz-Yañez JF. Weibull and Lognormal Taguchi Analysis Using Multiple Linear Regression. *Reliab Eng Syst Saf* 2015;144:244–53. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.08.004>.
14. Piña-Monarez MR. Conditional Weibull control charts using multiple linear regression. *Qual Reliab Eng Int* 2016;33(4): 785-791. <https://doi.org/10.1002/qre.2056>.
15. Franz Boehm, E. E. Lewis. A stress-strength interference approach to reliability analysis of ceramics: Part I — fast fracture Probabilistic Engineering Mechanics, 1992;7(1):1-8. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(92\)90002-Y](https://doi.org/10.1016/0266-8920(92)90002-Y).
16. Sales Filho RLM, López Droguett E, Lins ID, Moura MC, Amiri M, Azevedo RV. Stress-strength reliability analysis with extreme values based on q-exponential distribution. *Qual Reliab Engng Int.* 2017;33(3):457-477. <https://doi.org/10.1002/qre.2020>.
17. Al-Hemyari. Some estimators for the scale parameter and reliability function of Weibull lifetime data. *Proc IMechE, Part O: J Risk and Reliability* 2010;224:197-205. DOI: 10.1243/1748006XJRR299.
18. Kleyner A. Effect of field stress variance on test to field correlation in accelerated reliability demonstration testing. *Qual Reliab Engng Int.* 2015;31(5):783-788. <https://doi.org/10.1002/qre.1635>.

Modelo de transferencia de calor para concentradores solares con flujo bifásico

Ricardo Isaac Cázares-Ramírez¹, Sergio Quezada-García²,
Marco Antonio Polo-Labarríos², Heriberto Sánchez-Mora^{3*},

¹Universidad Autónoma Metropolitana–Iztapalapa, Ciudad de México, México.

Ricardo-cazares@hotmail.com

²Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria,
Coyoacán, Ciudad de México, México.

sequga@gmail.com, antonio.polo@cnsns.gob.mx

³Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Física y Matemáticas, Gustavo A. Madero,
Ciudad de México, México.

heribertosanchez7@hotmail.com

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla un modelo matemático dinámico de la transferencia de calor a través del tubo absorbedor de un concentrador solar Fresnel, que emplea como fluido de trabajo agua. Se considera que el agua cambia de fase a medida que fluye a través del tubo absorbedor, dando lugar a una región monofásica y una región bifásica. El modelo es validado con datos experimentales, publicados en la literatura, y se analiza la eficiencia térmica en función del recurso solar en este concentrador.

PALABRAS CLAVE

Fluido de trabajo; agua; concentrador solar fresnel; eficiencia térmica.

ABSTRACT

In this work, a dynamic mathematical model of heat transfer through the absorber tube of a Fresnel solar concentrator type, which uses water as working fluid, is developed. The water is considered to change phase as it flows through the absorber tube, giving rise to a monophasic region and a biphasic region. The model is validated with experimental data, published in the literature, and the thermal efficiency is analyzed as a function of the solar resource in this concentrator.

KEYWORDS

Heat transfer fluid; water; fresnel collector; thermal efficiency.

Nomenclatura

A_f	área de flujo	$[m^2]$
A_t	área externa del tubo absorbedor	$[m^2]$
C_p	capacidad calorífica	$[J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$
D_h	diámetro hidráulico	$[m]$
E_f	Eficiencia térmica	[adimensional]
f	coeficiente de fricción	[adimensional]
f_l	coeficiente de fricción de Blasius	[adimensional]
G_m	flux de masa de la mezcla homogénea	$[kg\ m^{-2}]$
h_m	entalpía específica de la mezcla	$[J\ kg^{-1}]$
h_{cf}	contribución de la fase líquida	$[W\ m^{-2}\ K^{-1}]$
h_{cv}	contribución de la fase de vapor	$[W\ m^{-2}\ K^{-1}]$
h_{cw}	coeficiente de transferencia de calor	$[W\ m^{-2}\ K^{-1}]$
h_{fg}	entalpía específica de cambio de fase	$[J\ kg^{-1}]$
k	conductividad térmica	$[W\ m^{-1}\ K^{-1}]$
L_m	longitud del espejo	$[m]$
L_t	Longitud del tubo absorbedor	$[m]$
$\dot{m}$	flujo másico	$[kg\ s^{-1}]$
n_m	número de espejos	[adimensional]
p	presión	$[Pa]$
p_{sat}	presión de saturación del fluido	$[Pa]$
P_h	perímetro mojado	$[m]$
Pr	número de Prandtl	[adimensional]
q''	potencia por unidad de área	$[W\ m^{-2}]$
q_p	calor perdido por radiación y/o convección	$[W\ m^{-2}]$
q_{sol}	radiación solar normal a los espejos	$[W\ m^{-2}]$
q_{sri}	radiación solar incidente	$[W\ m^{-2}]$
r_{in}	radio interno del tubo	[adimensional]
r_{out}	radio externo del tubo	[adimensional]
Re	número de Reynolds	[adimensional]
S_s	factor de supresión	[adimensional]
t	tiempo	$[s]$
T	temperatura	$[K]$
T_{sat}	temperatura de saturación del fluido	$[K]$
W	amplitud de los espejos	$[m]$
x	calidad del vapor	[adimensional]
X_{tt}	parámetro de Lockhart y Martenelli	[adimensional]
z	componente axial espacial	$[m]$

Caracteres griegos

α	fracción de vacíos	[adimensional]
γ	reflectividad de los espejos	[adimensional]
Γ_v	generación de masa de vapor	$[kg\ s^{-1}\ m^{-3}]$
Γ_l	generación de masa de líquido	$[kg\ s^{-1}\ m^{-3}]$
ε	rugosidad del tubo	$[m]$
ε_t	coeficiente de emisividad del tubo	[adimensional]
μ	viscosidad dinámica	$[kg\ m^{-1}\ s^{-1}]$
ρ	densidad	$[kg\ m^{-3}]$
ϕ^2	multiplicador de fricción	[adimensional]
σ_w	tensión superficial	$[N\ m^{-1}]$

Subíndices

l	fase líquida
m	mezcla
t	tubo
v	fase vapor

INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente preocupación por la protección del ambiente y al agotamiento de las reservas de los combustibles de origen fósil, como el petróleo y el gas, las fuentes alternativas y renovables de energía atraen cada vez más la atención de los investigadores a nivel mundial.¹

La energía solar es una fuente de energía renovable, limpia, confiable, abundante y duradera, que al ser integrada a diferentes sistemas de consumo de energía puede proporcionar una solución sostenible a largo plazo para mitigar los problemas derivados del aumento del consumo de combustibles de origen fósil.² La energía solar se ha convertido en una fuente esencial de energía debido al aumento de la demanda energética por la explosión demográfica y el calentamiento global.

La energía solar térmica es utilizada ampliamente en aplicaciones domésticas, industriales y comerciales como el secado solar, calefacción de espacios, refrigeración, calentamiento de agua, destilación, purificación de agua contaminada y desalación de agua de mar, por mencionar algunos.³⁻⁵ También se está utilizando para la extracción de biocombustibles producidos a partir de una amplia variedad de biomasa donde los gases producidos a partir de la pirolisis de biomasa asistida por energía solar tienen una alta concentración de productos combustibles que pueden utilizarse directamente como combustibles en motores o centrales eléctricas.⁶

Los concentradores solares son utilizados para convertir la irradiación solar en energía térmica. La tecnología termosolar de concentradores de cilindro-parabólicos es la más rentable, madura y probada para aprovechar la energía solar en áreas con alta concentración solar.⁷⁻⁸ Adicionalmente, esta tecnología tiene la máxima capacidad instalada en todo el mundo, la cual en mayo de 2020 fue de 8353 MW.⁸

Sin embargo, el diseño de concentradores de cilindro-parabólico más eficientes sigue siendo un área de investigación exigente y desafiante.⁹ Una amplia gama de aplicaciones requieren que tanto la eficiencia térmica como óptica de esta tecnología se maximice con una penalización razonablemente en la caída de presión. Por otro lado, se han investigado diferentes técnicas para mejorar su rendimiento global. El modelado matemático de los concentradores solares es una herramienta importante para analizar los procesos de transferencia de calor, con el objetivo de maximizar su rendimiento óptico, térmico e hidráulico.⁹ Estos modelos matemáticos también permiten realizar análisis económicos, tienen la posibilidad de centrarse en aspectos que son difíciles de investigar experimentalmente, y pueden ser utilizados para diseñar sistemas de control para automatizar su operación. Para operaciones con flujo bifásico contar con sistemas eficaces de control del proceso es el reto actual que hay que abordar.⁸

Sin embargo, la mayoría de los modelos y de las simulaciones de concentradores solares que aparecen en la literatura son unidimensionales o tienen múltiples simplificaciones que hacen que el modelo no ofrezca una estimación aceptable de las pérdidas de calor y la fracción de volumen de vapor.¹⁰ Es decir, los modelos no consideran el cambio de fase del fluido de trabajo dentro del tubo absorbedor, para lo cual se necesita considerar flujo bifásico. Los modelos tridimensionales de concentradores solares que existentes en la literatura son implementados en software CFD (Computational Fluid Dynamics) (e.g.¹⁰⁻¹²) al igual que los modelos que consideran flujo bifásico.¹³ Aunque los CFD ofrecen grandes ventajas también tienen desventajas como la capacidad de cómputo que se requiere para llevar a cabo las simulaciones. Si se reduce demasiado el número de nodos, en sistemas en estado estacionario, para ahorrar tiempo y costos de cálculo los resultados tienen gran incertidumbre. Estos resultados tienen aún más incertidumbre para sistemas dinámicos donde además se debe de tener en cuenta el tamaño de paso temporal que incrementa de manera considerable el tiempo de ejecución de las simulaciones.

Por otro lado, Kumar *et al.*¹⁴ realizaron una revisión donde encontraron que la mayoría de los investigadores trabajan con agua como fluido caloportador. Esto es debido a que se ha encontrado que la generación directa de vapor mejora la rentabilidad de la generación de energía en términos de mayor eficiencia térmica, menor coste global y excelente potencial de ampliación.⁸ Por lo tanto, es necesario desarrollar un modelo matemático ampliamente aplicable para el análisis de rendimiento/sensibilidad de la generación directa de vapor.⁸

En el presente trabajo se desarrolla un modelo dinámico de transferencia de calor para flujo bifásico ampliamente aplicable a concentradores solares de tipo cilindro-parabólico y tipo Fresnel, que utilizan como fluido de trabajo agua. El modelo es resultado numéricamente e implementado en C++ para una rápida ejecución, permitiendo obtener resultados en tiempo real, debido a que representa una ligera carga computacional comparado con el software CFD. El modelo es validado con datos reportados en la literatura. Finalmente se analiza la eficiencia de un concentrador solar tipo Fresnel cuando se tiene generación directa de vapor en el tubo absorbedor, es decir bajo condiciones de flujo bifásico.

MODELO MATEMÁTICO

En esta sección se presenta el modelo matemático dinámico para flujo bifásico el cual consiste básicamente en cuatro ecuaciones que representan el transporte de momento, el transporte de masa y la conservación de la energía para cada fase. Posteriormente, se presenta el modelo dinámico de transferencia de calor para el tubo absorbedor y finalmente se menciona el método de solución numérica.

Modelo de Flujo Bifásico

El modelo dinámico de flujo bifásico considera 4 ecuaciones bajo la suposición de flujo homogéneo, unidimensional. Las Ecs. (1) - (4) representan el transporte de momento para flujo homogéneo, la conservación de la energía, el transporte de masa para la fase vapor y el transporte de masa para la fase de líquida, respectivamente,¹⁵

$$\frac{\partial G_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G_m^2}{\rho_m} \right) = \frac{\partial p}{\partial z} - f \frac{G_m |G_m|}{2\rho_m D_h} \quad (1)$$

$$\rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + G_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = \frac{q'' P_h}{A_f} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{G_m}{\rho_m} \left(f \frac{G_m |G_m|}{2\rho_m D_h} + \frac{dp}{dz} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho_v \alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(G_m x)}{\partial z} = \Gamma_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_l [1-\alpha])}{\partial t} + \frac{\partial(G_m [1-x])}{\partial z} = \Gamma_l \quad (4)$$

donde G_m es el flux de masa de la mezcla homogénea, ρ_m es la densidad de la mezcla, ρ_l es la densidad del líquido, ρ_v es la densidad del vapor, p es la presión, f es el coeficiente de fricción, D_h es el diámetro hidráulico, h_m es la entalpía específica de la mezcla, q'' es la potencia por unidad de área transferida entre el fluido de trabajo y la pared de contacto, P_h es el perímetro mojado, α es la fracción de vacíos, x es la calidad del vapor, Γ_v es generación de masa de vapor por unidad de volumen, Γ_l es la generación de masa de líquido por unidad de volumen, A_f es el área de flujo, z es la componente axial espacial y t es el tiempo.

Por otro lado, la densidad de la mezcla, la calidad del vapor, y la fracción de vacíos se calculan como muestran las Ecs. (5), (6) y (7), respectivamente.

$$\rho_m = \rho_l (1-\alpha) + \rho_v \alpha \quad (5)$$

$$x = \frac{h_m - h_l}{h_{fg}} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{1-x}{x} \right) \frac{\rho_v}{\rho_l}} \quad (7)$$

donde h_{fg} es la entalpía específica de cambio de fase y h_l es la entalpía específica de la fase líquida. La potencia transferida por unidad de área entre la pared y el fluido se establece de la siguiente manera,

$$q'' = h_{cw} \left(T_t|_{r=r_{in}} - T_m \right) \quad (8)$$

donde T_t y T_m representan las temperaturas de la pared del tubo y de la mezcla del fluido, respectivamente; h_{cw} es el coeficiente de transferencia de calor entre la pared y el fluido, que depende de la calidad del vapor y la velocidad del flujo. Es decir, se tiene flujo en bifásico, el coeficiente de transferencia de calor convectivo es calculado usando la correlación propuesta por Chen,¹⁶ la cual calcula el coeficiente de transferencia de calor para flujo bifásico como la suma de las contribuciones de las fases líquida y vapor,

$$h_{cw} = h_{cf} + h_{cv} \quad (9)$$

donde h_{cf} y h_{cv} son las contribuciones de las fases líquida y vapor, respectivamente.

El valor de h_{cf} se obtiene con la siguiente expresión,

$$h_{cf} = 0.023 \left[\frac{G_m (1-x) D_h}{\mu_l} \right]^{0.8} \text{Pr}_l^{0.4} \frac{k_l}{D_h} F \quad (10)$$

donde μ_l es la viscosidad dinámica, k_l es la conductividad térmica, y Pr_l es el número adimensional de Prandtl de la fase líquida que está definido como,

$$\text{Pr}_l = \frac{Cp_l \mu_l}{k_l} \quad (11)$$

donde Cp_l es la capacidad calorífica de la fase líquida. El factor F varía de la siguiente manera,

$$F = 1 \quad \frac{1}{X_{tt}} < 0.1 \quad (12)$$

$$F = 2.35 \left(0.213 + \frac{1}{X_{tt}} \right) \quad \frac{1}{X_{tt}} > 0.1 \quad (13)$$

X_{tt} se denomina parámetro de Lockhart y Martenelli,¹⁷ y se calcula de la siguiente forma,

$$\frac{1}{X_{tt}} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_v}{\mu_l} \right)^{0.1} \quad (14)$$

donde μ_v es la viscosidad dinámica de la fase vapor.

Para el cálculo de h_{cv} se tiene,

$$h_{cv} = S_s (0.00122) \left[\frac{k_l^{0.79} Cp_l^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma_w^{0.5} \mu_l^{0.29} h_{fg} \rho_v^{0.24}} \right] \left(T_t|_{r=r_{in}} - T_{sat} \right)^{0.24} \left(p_{sat}|_{T_t|_{r=r_{in}}} - p_{sat}|_{T_{sat}} \right)^{0.75} \quad (15)$$

donde σ_w es la tensión superficial, T_{sat} es la temperatura de saturación del fluido a la presión establecida, p_{sat} es la presión de saturación del fluido en la temperatura evaluada. S_s es el factor de supresión y es dado por,

$$S_s = \frac{1}{1 + 2.53 \times 10^{-6} \text{Re}_s^{1.17}} \quad (16)$$

donde

$$\text{Re}_s = \text{Re}_l F^{1.25} \quad (17)$$

y

$$\text{Re}_l = \frac{G_m (1-x) D_h}{\mu_l} \quad (18)$$

Re_l es el número de Reynolds de la fase líquida.

El coeficiente de transferencia de calor para la fase líquida se calcula en función del valor de número de Reynolds de acuerdo con las siguientes correlaciones,

Correlación de Edward,¹⁸

$$h_{cw} = \left(3.66 + \frac{0.065 \left(\frac{D_h}{L_t} \right) \text{Re}_l \text{Pr}_l}{1 + 0.04 \left[\left(\frac{D_h}{L_t} \right) \text{Re}_l \text{Pr}_l \right]^{\frac{2}{3}}} \right) \frac{k_l}{D_h} \quad \text{Re}_l < 2300 \quad (19)$$

Correlación de Pethukov,¹⁹

$$h_{cw} = \left(\frac{0.125 \text{Re}_l \text{Pr}_l^{1/3}}{(0.79 \ln \text{Re}_l - 1.64)^2} \right) \frac{k_l}{D_h} \quad 2300 < \text{Re}_l < 10000 \quad (20)$$

Correlación de Dittus-Boltter,²⁰

$$h_{cw} = (0.023 \text{Re}_l^{0.8} \text{Pr}_l^{0.4}) \frac{k_l}{D_h} \quad \text{Re}_l > 10000 \quad (21)$$

donde L_t es la longitud de la tubería.

Para calcular el coeficiente de fricción para la fase líquida se utilizó la correlación de Colebrook²¹ aproximada por Haaland²² para una fácil manipulación,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log_{10} \left[\frac{6.9}{\text{Re}_l} + \left(\frac{\varepsilon / D_h}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (22)$$

donde ε es la rugosidad del tubo. El coeficiente de fricción en el caso de flujo bifásico está dado por,

$$f = f_l \phi^2 \quad (23)$$

donde f_l es el coeficiente de fricción de Blasius²³ y ϕ^2 es el multiplicador de fricción, dados por

$$f_l = 0.0791 \text{Re}_l^{-0.25} \quad (24)$$

$$\phi^2 = \left[1 + x \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right) \right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} - 1 \right) \right]^{-0.25} \quad (25)$$

El segundo término del lado derecho de la Ec. (25) representa la correlación de McAdams *et al.*²⁴

Transferencia de calor en el tubo absorbedor

Para considerar la transferencia de calor a través del radio del tubo absorbedor del concentrador solar, se evalúa la ecuación de transferencia de calor por conducción en la dirección radial y se aplica para cada nodo axial una vez que el sistema está nodalizado,

$$(\rho C_p)_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = k_t \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_t}{\partial r} \right) \quad r_{in} \leq r \leq r_{out} \quad (26)$$

donde el subíndice t asocia las propiedades térmicas del tubo del concentrador solar, r_{in} y r_{out} son el radio interno y externo del tubo, respectivamente. Las condiciones de frontera de la Ec. (26) son las siguientes,

$$k_l \frac{\partial T_t}{\partial r} \Big|_{r=r_{in}} = h_{cw} (T_t|_{r=r_{in}} - T_m) \quad (27)$$

$$-k_l \frac{\partial T_t}{\partial r} \Big|_{r=r_{out}} = q_{sri} - q_p \quad (28)$$

donde q_{sri} es la radiación solar incidente y q_p es el calor perdido por radiación y/o convección.

Solución numérica

Las Ecs. (1) - (4) y (26), son aproximadas mediante el método de diferencias finitas y son resueltas de manera explícita, excepto la Ec. (26) que es resuelta de forma implícita mediante el algoritmo de Thomas.²⁵

VALIDACIÓN

Para validar el modelo desarrollado en este trabajo se comparan los resultados obtenidos con los datos reportados por Sahoo *et al.*²⁶ y Sahoo *et al.*²⁷ Los primeros, presentan la validación de un modelo propio de los autores y, los segundos, presentan el resultado obtenido utilizando el código de simulación RELAP5/MOD3,²⁸ donde se implementa el mismo experimento, el cual consiste en el calentamiento de agua en un sistema de tubos absorbedores con un Reflector Solar Fresnel Lineal, donde la cavidad receptora tiene geometría trapezoidal y está llena de aire, lo que aumenta las pérdidas de calor dada la convección natural, adicionalmente tiene una cubierta de vidrio en la parte inferior donde incide la radiación solar. Debajo de la cavidad receptora se tienen 8 espejos reflectores de 1.8 m de ancho y una longitud de 48 m. La longitud de la cavidad receptora es de 48 m, donde el tubo receptor tiene una longitud total de 384 m, como muestra la figura 1. Las características principales del concentrador solar para este trabajo se muestran en la tabla I.

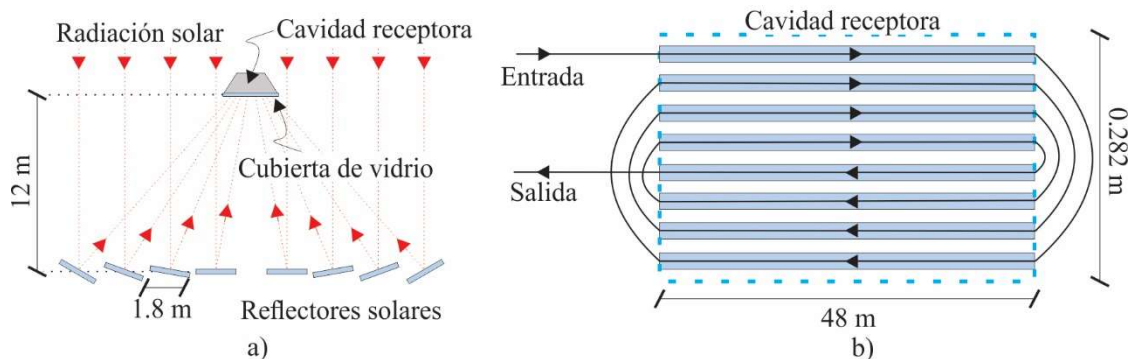


Fig. 1. a) Reflector lineal Fresnel y b) configuración del tubo absorbedor dentro de la cavidad receptora.

Tabla II. Características del concentrador solar.²⁶

Parámetro	Valor	Unidad
Presión del sistema	4.5	MPa
Número de espejos reflectores (n_m)	8	-
Amplitud de los espejos (W)	1.8	m
Longitud de los espejos (L_m)	48	m
Reflectividad de los espejos (γ)	0.8	-
Longitud de la cavidad (L_m)	48	m
Longitud del tubo absorbedor (L_t)	384	m
Radio interno del tubo (r_{in})	13.35	mm
Radio externo del tubo (r_{out})	16.7	mm
Radiación solar normal a los espejos (q_{sol})	667	W m ⁻²
Flujo másico (m)	0.15	kg/s

Por un lado, es necesario determinar la cantidad de radiación incidente en el tubo receptor, la cual está dada por,

$$q_{sri} = \frac{n_m A_m \gamma}{2\pi r_{out} L_t} q_{sol} \quad (29)$$

donde q_{sol} es la radiación normal que incide en los espejos y A_m es el área de un espejo. Por otro lado, en el trabajo de Sahoo *et al.*²⁷ se muestra la curva de pérdida de calor (emisión y convección) en función de la temperatura del tubo concentrador, la cual fue obtenida mediante el sistema experimental y de los datos dados de Sahoo *et al.*²⁶ En este trabajo la curva es aproximada con la Ec. (30) con un valor de la bondad ajuste de la regresión propuesta de $R^2 = 0.9997$

$$q_p = 1015.7 - 8.0639 T_t|_{r_{out}} + 0.0157 T_t^2|_{r_{out}} \quad (30)$$

Las Ecs. (29) y (30) son agregadas al modelo matemático a través de la Ec. (28) para determinar la cantidad de calor que se transporta hacia el fluido de trabajo. Una vez realizado lo anterior, se comparan los resultados obtenidos por el presente modelo y los resultados obtenidos en²⁶ y ²⁷, tanto resultados experimentales como obtenidos por los códigos utilizados.

Debido a que el modelo realizado es dinámico, es necesario tomar los datos, para la validación, una vez que se alcanza el estado estacionario. La figura 2 muestra el calentamiento del fluido en el tubo absorbedor a diferentes tiempos, alcanzando el estado estacionario después de 1500 s. La figura 3a muestra la comparación de la temperatura del fluido a través del tubo absorbedor, donde es evidente que el modelo propuesto, en el presente trabajo, describe de manera bastante exacta la transferencia de calor en el tubo absorbedor. El modelo realizado por Sahoo *et al.*²⁶ y la simulación hecha con RELAP5 en el trabajo de Sahoo *et al.*²⁷ muestran resultados bastante similares con una leve desviación con respecto a los resultados experimentales antes de alcanzar la temperatura de saturación. Con respecto a la calidad del vapor, la figura 3b muestra que el trabajo realizado por Sahoo *et al.*²⁶ (curva azul) tiene un ajuste formidable con el resultado experimental, con un valor cercano a 0.355, sin embargo, lo obtenido en Sahoo *et al.*²⁷ (curva verde) sobrestima con un valor cercano a 0.396, y con el presente trabajo (curva negra) se tiene un valor de 0.340 de la calidad. Por lo antes mencionado, del presente modelo se obtienen resultados aceptables en comparación a los datos experimentales, con un mejor ajuste en la temperatura del fluido, por lo cual el modelo puede ser aplicado para otro escenario donde se considere flujo en dos fases.

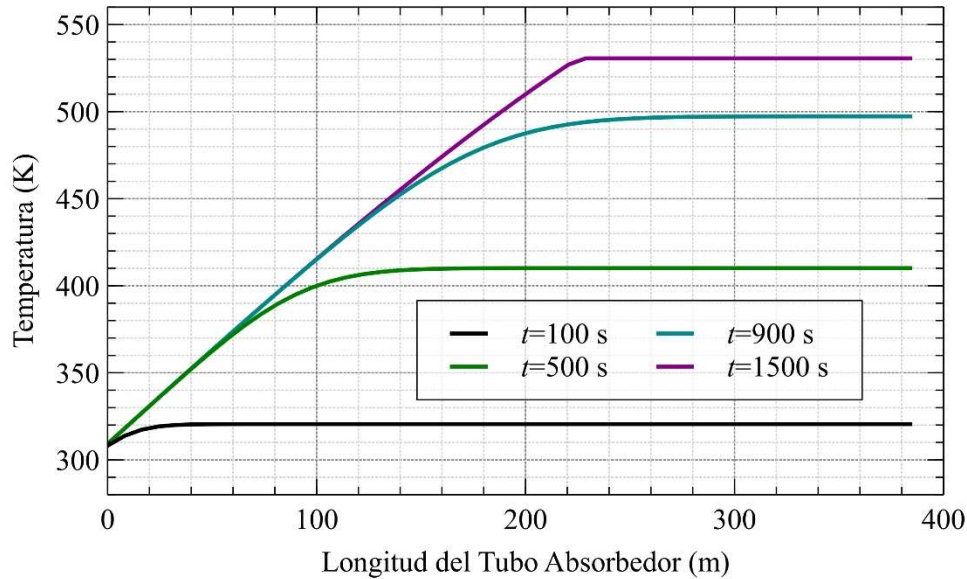


Fig. 2. Temperatura del fluido a través del tubo absorbedor a diferentes tiempos.

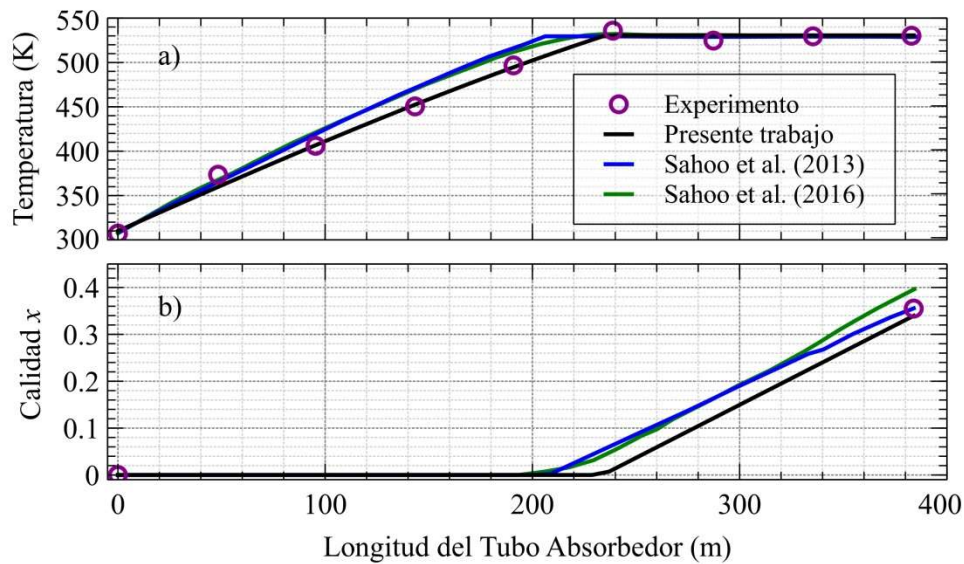


Fig. 3. Temperatura del fluido a través del tubo absorbedor y calidad del vapor.

CASO DE ESTUDIO

Con el fin de determinar la eficiencia de este tipo de concentrador, resulta prudente realizar un análisis de eficiencia en función de la radiación incidente, debido a que el recurso solar depende de las condiciones ambientales como nubosidad, contaminación, humedad, etc. Por lo anterior, mediante la variación de la radiación incidente se establece la eficiencia del concentrador manteniendo constante el valor del flujo de agua. En la figura 4a se muestra la variación del perfil de temperatura a diferentes condiciones de radiación incidente en los espejos del concentrador, y en la figura 4b se muestra la pérdida de calor a través del concentrador. En la figura 4a se observa que, al aumentar la cantidad de radiación solar incidente, en los espejos el agua alcanza la temperatura de saturación en posiciones más cercanas a la posición de entrada del fluido y se mantiene a la misma temperatura, a lo largo del tubo absorbedor, siempre y cuando no se obtenga vapor sobrecalentado. Esto altera

considerablemente a la pérdida de calor, debido a que al llegar a la temperatura de saturación la pérdida de calor es constante debido a que la temperatura superficial del tubo absorbedor es constante, esto se ilustra en la figura 4b y se corrobora con la figura 4a.

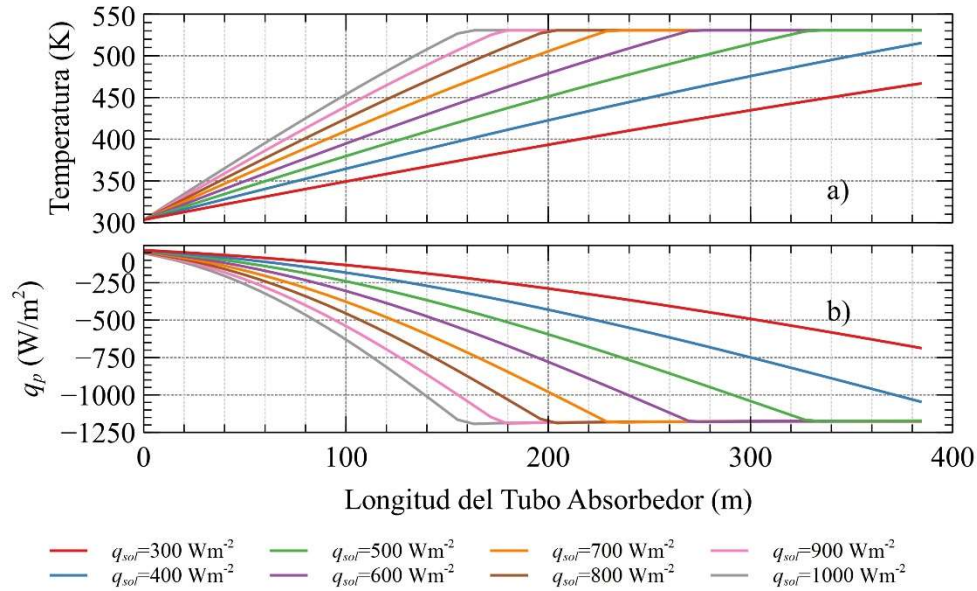


Fig. 4. a) Variación de la temperatura y b) pérdida de flujo calor a través del concentrador para distinta radiación incidente.

Independientemente de las necesidades a las que el fluido de trabajo debe de salir del concentrador, la eficiencia en este trabajo está relacionada específicamente en el aprovechamiento del recurso solar, y para dicho propósito se emplea la siguiente ecuación,

$$Ef = \dot{m} \frac{(h_m|_{z=L_t} - h_m|_{z=0})}{q_{sri} A_t} \quad (31)$$

donde $\dot{m}$ es el flujo de agua. En la figura 5 se grafica la eficiencia en función de la radiación incidente con la misma parametrización de ésta, como la que se mostró en la figura 4. En la Figura 5 se puede ver que ante condiciones de radiación menores a los 500 Wm^{-2} existe una reducción gradual en la eficiencia del concentrador solar que, como se describió acerca de la figura 4b, está ligada a la pérdida de calor gradual ya que el fluido de trabajo absorbe calor sensible bajo esta condición de radiación incidente, excepto por una región de 50 m en el caso de 500 Wm^{-2} . Para valores de radiación solar mayores a 500 Wm^{-2} , el calor latente en el fluido de trabajo toma relevancia en la pérdida de calor constante en estas regiones, por lo que un aumento en la eficiencia es descrito en la figura 5. Sin embargo, la variación de la eficiencia en función de la radiación solar mantiene su valor alrededor de 62.5 % con una variación de $\pm 0.75\%$.

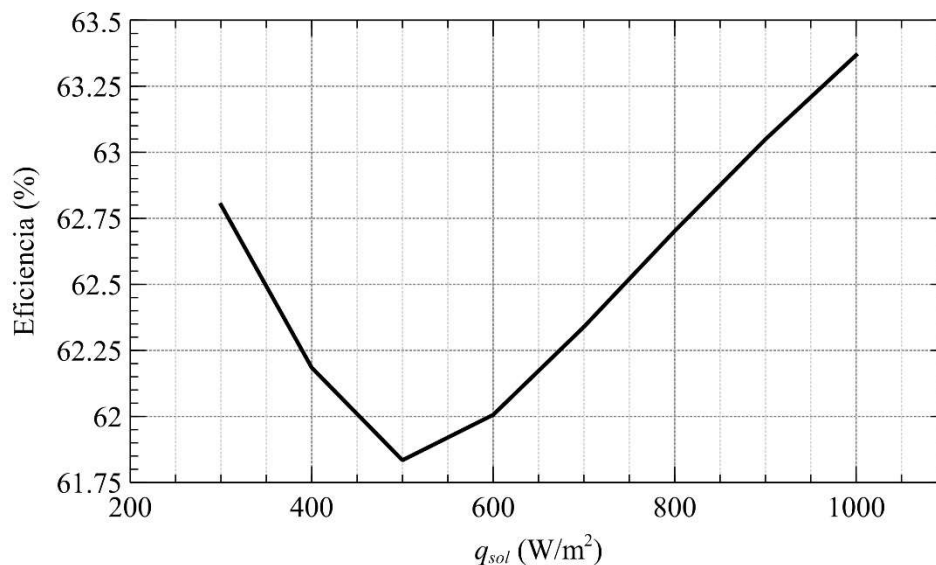


Fig. 5. Eficiencia del concentrador en función de la radiación solar.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó un modelo matemático dinámico de transferencia de calor para flujo bifásico, el cual fue validado con datos experimentales de Sahoo *et al.*²⁶, mostrando resultados adecuados con un mejor ajuste en el perfil de temperaturas del fluido a través del concentrador, y una calidad de vapor del agua a la salida del concentrador solar con un valor de $x = 0.340$ en la simulación, en comparación con el valor experimental de $x = 0.355$, dando un error del 4.22 %, que es bastante aceptable para el modelo matemático.

Como caso de estudio se evaluó la eficiencia térmica del concentrador solar con el modelo matemático para diferentes condiciones de recurso solar, es decir, radiación proveniente del sol. De este último se determinó que el efecto de calor latente hace que el calor perdido prevalezca constante en regiones donde se ha alcanzado la temperatura de saturación, como es de esperarse, ya que la pérdida de calor es función de la temperatura del tubo absorbedor como se presenta en Ec. (30), afectando de este modo en la eficiencia del sistema, debido a que la pérdida calor aumenta en regiones donde el calor sensible es predominante como consecuencia del aumento de temperatura del fluido, y así, la temperatura del tubo absorbedor. Cabe mencionar que esta variación en la eficiencia no es tan perceptible, solo oscila en $\pm 0.75\%$ del valor medio que está alrededor del 62.5 %.

REFERENCIAS

1. S.F. Moosavian, D. Borzuei, A. Ahmadi, Energy, exergy, environmental and economic analysis of the parabolic solar collector with life cycle assessment for different climate conditions, *Renew. Energy*. 165 (2021) 301–320. doi:10.1016/J.RENENE.2020.11.036.
2. S.K. Sansaniwal, V. Sharma, J. Mathur, Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018) 1576–1601. doi:10.1016/J.RSER.2017.07.003.
3. A. Raheem, W. Siddique, Z.H. Farooqui, T. Salameh, I. Haq, K. Waheed, K. Qureshi, Performance evaluation of adding Helical-screw Tape Inserts in Parabolic Solar Trough Collectors as a Source of Cleaner Energy Production, *J. Clean. Prod.* 297 (2021) 126628.
4. P.P. Dutta, S.S. Begum, H. Jangid, A.P. Goswami, T. Doley, M. Bardalai, P.P. Dutta, Modeling and performance evaluation of a small solar parabolic trough collector (PTC) for possible purification of drained water, *Mater. Today Proc.* (2021). doi:10.1016/J.MATPR.2021.04.489.
5. B. Mohseni-Gharyehsafa, J.A. Esfahani, K.C. Kim, H. Ouerdane, Soft computing analysis of

- thermohydraulic enhancement using twisted tapes in a flat-plate solar collector: Sensitivity analysis and multi-objective optimization, *J. Clean. Prod.* 314 (2021) 127947.
6. H. Weldekidan, V. Strezov, R. Li, T. Kan, G. Town, R. Kumar, J. He, G. Flamant, Distribution of solar pyrolysis products and product gas composition produced from agricultural residues and animal wastes at different operating parameters, *Renew. Energy*. 151 (2020) 1102–1109.
7. X. Xu, K. Vignarooban, B. Xu, K. Hsu, A.M. Kannan, Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 53 (2016) 1106–1131. doi:10.1016/J.RSER.2015.09.015.
8. R. Pal Kumar, K.R. Kumar, Investigations of thermo-hydrodynamics, structural stability, and thermal energy storage for direct steam generation in parabolic trough solar collector: A comprehensive review, *J. Clean. Prod.* 311 (2021) 127550. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2021.127550.
9. S. Thappa, A. Chauhan, Y. Anand, S. Anand, Analytical comparison of two distinct receiver tubes of a parabolic trough solar collector system for thermal application, *Mater. Today Proc.* 28 (2020) 2212–2217.
10. A. Najafi, A. Jafarian, A. Arabkoohsar, A thorough three-dimensional simulation of steam generating solar parabolic trough collectors, a benchmark of various methods' accuracy, *Sustain. Energy Technol. Assessments*. 47 (2021) 101456. doi:10.1016/J.SETA.2021.101456.
11. S.E. Ghasemi, A.A. Ranjbar, Effect of using nanofluids on efficiency of parabolic trough collectors in solar thermal electric power plants, *Int. J. Hydrogen Energy*. 42 (2017) 21626–21634. doi:10.1016/J.IJHYDENE.2017.07.087.
12. M. Siavashi, M. Vahabzadeh Bozorg, M.H. Toosi, A numerical analysis of the effects of nanofluid and porous media utilization on the performance of parabolic trough solar collectors, *Sustain. Energy Technol. Assessments*. 45 (2021) 101179. doi:10.1016/J.SETA.2021.101179.
13. R. Kumar Pal, K. Ravi Kumar, Two-fluid modeling of direct steam generation in the receiver of parabolic trough solar collector with non-uniform heat flux, *Energy*. 226 (2021) 120308. doi:10.1016/J.ENERGY.2021.120308.
14. A. Kumar, A. Kumar Tiwari, Z. Said, A comprehensive review analysis on advances of evacuated tube solar collector using nanofluids and PCM, *Assessments*. 47 (2021) 101417.
15. N.E. Todreas, M.S. Kazimi, *Nuclear Systems I: Thermal Hydraulic Fundamentals*, Hemisphere Publishing Corporation, USA, 1990.
16. J.C. Chen, A Correlation for Boiling Heat Transfer or Saturated Fluids in Convective Flow, *ASME Pap.* 63-HT-34. (1963).
17. R.W. Lockhart, R. Martinelli, Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two component flow in pipes, *Chem. Eng. Prog.* 45 (1949) 39–48.
18. D.K. Edwards, V.E. Denny, A.F. Mills, *CHAPTER VI Transfer Processes*, 2nd ed., Washington, D.C, 2008. doi:10.1016/s0074-6142(08)60507-0.
19. B.S. Pethukov, Heat Transfer and friction in turbulent pipe flow with variable physical properties, *Adv. Heat Transf.* 6 (1970) 504–564.
20. F.W. Dittus, L.M.K. Boelter, Heat Transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 12 (1985) 3–22.
21. C.F. Colebrook, Turbulent flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition between the Smooth and Rough Pipes Laws, *J. Inst. Civ. Eng. London*. 11 (1939) 133–156.
22. S.E. Haaland, Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow, *J. Fluids Eng.* (1983) 89–90.
23. R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, Wiley, 1924.
24. W.H. McAdams, W.K. Woods, L.C. Heroman, Vaporization inside horizontal tubes - II: Benzene-oil mixture, *Trans. ASME*. 64 (1942) 193–200.
25. S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1980.
26. S.S. Sahoo, S. Singh, R. Banerjee, Steady state hydrothermal analysis of the absorber tubes used

- in Linear Fresnel Reflector solar thermal system, *Solar Energy, Sol. Energy.* 87 (2013) 84–95.
- 27.S.S. Sahoo, S. Singh, R. Banerjee, Thermal hydraulic simulation of absorber tubes in linear Fresnel reflector solar thermal system using RELAP, *Renew. Energy* 2. 86 (2016) 507–516.
- 28.INEL, RELAP5/MOD3 code manual: Code structure, system models, and solution methods. Volume 1, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States), 1995.

Niveles sonoros en casa habitación en la ZMM-Mx durante la primera fase de COVID-19 en 2020

Fernando J. Elizondo-Garza

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Laboratorio de Acústica. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

fjelizon@gmail.com

RESUMEN

La pandemia de COVID-19 generó profundos cambios en la vida cotidiana y, con el confinamiento y la instauración de medidas sanitarias, produjo cambios en la generación de sonidos tanto en la vida privada como en la pública. Aquí se presentan resultados de mediciones con una estación de monitoreo continuo de sonido en una casa habitación en la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), México, desde abril a agosto de 2020, durante el primer período de confinamiento y en el inicio de la primera apertura parcial. Se discuten los resultados de las mediciones y se comentan observaciones de campo realizados durante dicho periodo.

PALABRAS CLAVE

COVID-19, confinamiento, paisaje sonoro, sonido, ruido, Zona Metropolitana de Monterrey.

ABSTRACT

COVID-19 generated deep changes in everyday life and, with the confinement and the implementation of sanitary measures, changes in sound generation occurred in both private and public life. Here we present the results of measurements with a continuous sound monitoring station at a house in the Metropolitan Zone of Monterrey-Mexico (ZMM), from April to August 2020, during the first period of confinement and the beginning of the first partial opening. This article discusses the results of the measurements and comments on field observations made during this period.

KEYWORDS

COVID-19, lockdown, soundscape, sound, noise, Metropolitan Zone of Monterrey-Mexico.

INTRODUCCIÓN

La pandemia por la COVID-19 sorprendió a la sociedad en general y ha generado una serie de estrategias preventivas y de control, por parte de las autoridades de cada país, que cambiaron la forma de vida humana como no ocurría desde hacía mucho tiempo.^{1,2} Entre las estrategias gubernamentales implementadas, el confinamiento, el distanciamiento social y la suspensión de actividades masivas, modificó radicalmente la actividad humana, siendo una de sus implicaciones, entre muchas otras, un cambio en los paisajes sonoros a escala mundial, resultando en lo general en un ambiente más tranquilo.³

El autor se comunicó con especialistas de diferentes países, y coincidieron en que esa situación de confinamiento por la COVID-19 abría una oportunidad única para evaluar las condiciones del paisaje sonoro en esta breve realidad extraordinaria, para luego compararla con futuras mediciones bajo condiciones de una “nueva normalidad” (sin restricciones gubernamentales) una vez declarada finalizada la pandemia, y así poder obtener una idea del cambio en la calidad de los paisajes sonoros debido al distanciamiento social y el encierro.

La Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) suspendió abruptamente actividades presenciales en su campus, enviando a los profesores e investigadores a confinamiento en sus casas, y pronto se decidió recurrir a la docencia en línea para finalizar el año escolar 2020. La Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL autorizó instalar una estación de monitoreo continuo de sonido en una casa del Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), para registrar los niveles sonoros durante y después de la etapa de primer confinamiento impuesto para evitar la propagación del virus SARS-CoV-2.

Se decidió colocar la estación de monitoreo de sonido^{4,5} en un lugar en el que el paisaje sonoro de la ciudad, influenciado por automóviles, camiones, trenes, aviones, equipos de aire acondicionado y

vecindario; así como el de la vida cotidiana dentro de la casa pudiera registrarse durante y después del confinamiento.⁶

METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

La estación de monitoreo de sonido se instaló por razones de seguridad, y aprovechando la orden de confinamiento, en el patio trasero de una casa ubicada en $25^{\circ}45'19.43''$ N $100^{\circ}18'19.51''$ O en San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, una de las ciudades conurbadas de la ZNM. Ver figura 1.

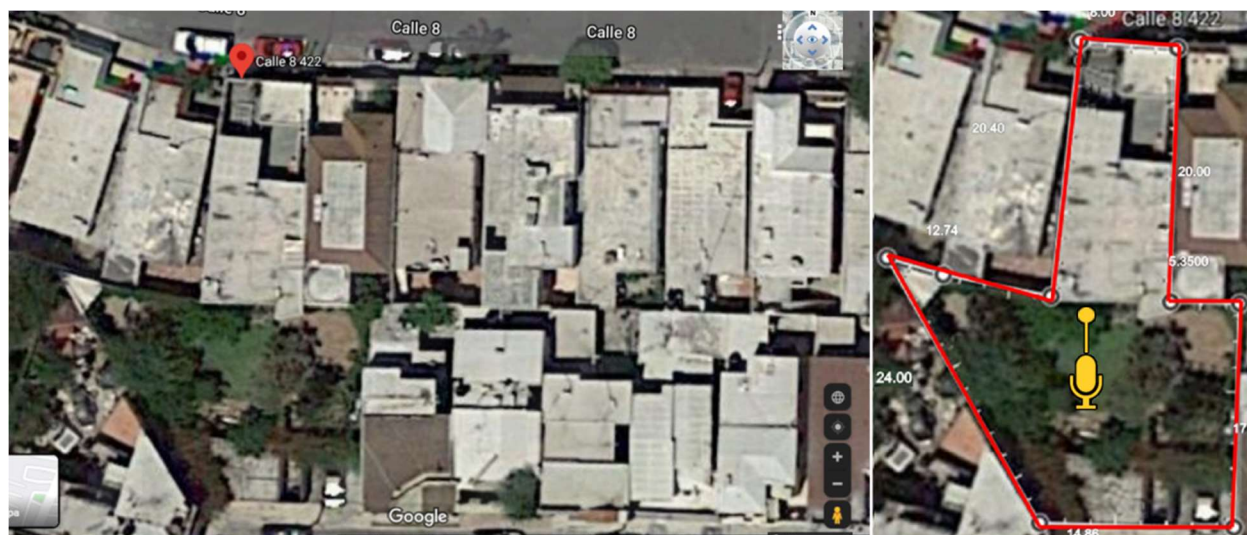


Fig. 1. Ubicación de la estación de monitoreo en patio de casa habitación en zona habitacional de clase media en la ZMM.⁷

En la figura 2 se muestra la ubicación de la casa y sus alrededores: vías de tren, avenidas principales, zona industrial, autopistas, casas suburbanas, calles residenciales.

Para llevar a cabo el monitoreo, se utilizó un sistema de medición de sonido de clase 1: Medidor de nivel sonoro BSWA308® (cumple con IEC 61672-1:2013) con:⁸

- procesamiento paralelo de curvas de ponderación A, B, C, Z;
- bandas de un tercio de octava [6,3 Hz a 20 kHz];
- preamplificador MA231T [3 Hz a 20 kHz, ruido intrínseco de 24 dBZ (13 dBA)];
- micrófono MP231 de 1/2" [ruido intrínseco de 31 dBZ (19 dBA)] y sensibilidad de 40 mV/Pa;
- cable de extensión y protección de micrófono para exterior.

El sistema se verificó con un calibrador sonoro Bruel & Kjaer tipo 4230 de clase 1. Se deja en claro que el equipo entrega valores numéricos los cuales se procesaron informáticamente, y los registros no son archivos de sonido digital.

El micrófono se colocó en un soporte metálico dentro del patio trasero, y suspendido a 2.60 m del suelo y a 1.60 m de la fachada, con el que se captaron desde el ruido de fondo, influido principalmente por las fuentes sonoras lejanas, hasta los sonidos causados por la vida cotidiana en el hogar durante y después de la orden de confinamiento. Con esta configuración se realizó la medición sólo para hacer comparaciones y tener idea de los cambios, si los hubiera, en los niveles sonoros y sus valores estadísticos.

El paisaje sonoro se registró ininterrumpidamente (24/7) desde el 20 de abril de 2020, durante el tiempo de confinamiento y después. También se registró el espectro del paisaje sonoro por bandas de un tercio de octava.

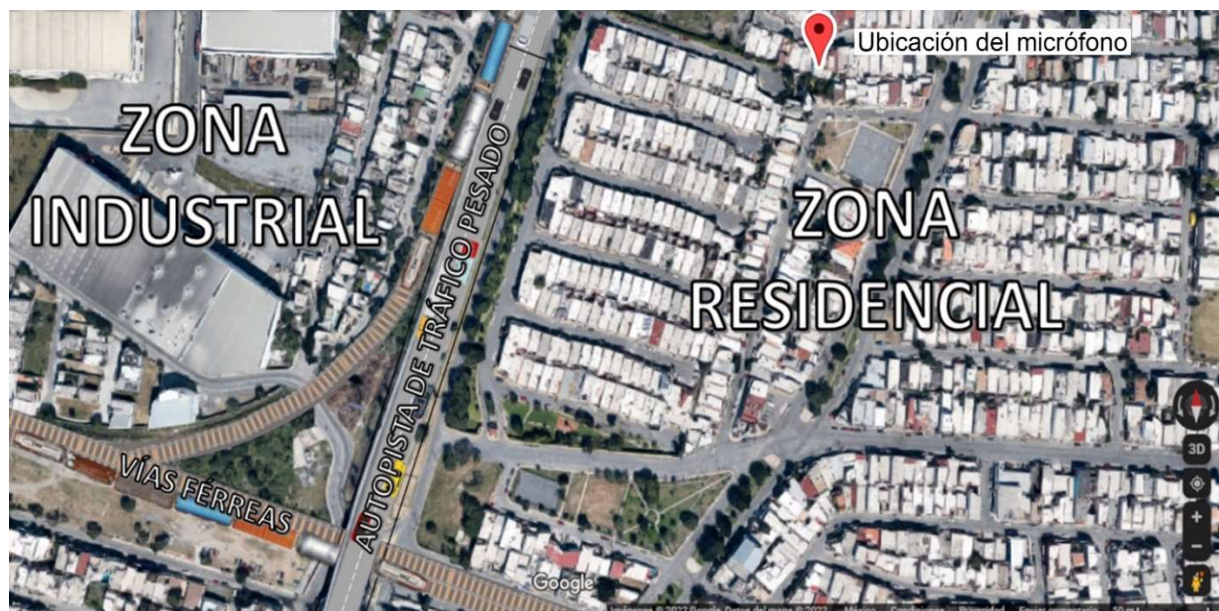


Fig. 2. Alrededores de la casa donde se ubicó la estación de monitoreo sonoro.⁷

Todos los días, por la tarde, los datos de 24 horas se descargaban para su procesamiento. El archivo de datos sin procesar contiene 41 valores cada 0.5 s por cada banda de tercio de octava (tamaño de ≈ 44 Mb), que se procesó utilizando un programa informático basado en macros escritos en VBA Excel®. Los datos se organizaron posteriormente en días, período día-tarde-noche según ISO, período día-noche según legislación de México. Se evaluaron los parámetros: $L_{Aeq,T}$, $L_{Ceq,T}$, $L_{Zeq,T}$, $L_{Geq,T}$ (según ISO 7196); así como parámetros estadísticos.⁴⁻⁵

El objeto de este artículo es el comparar los niveles sonoros medidos durante el primer encerramiento con los de la condición posterior de “primera apertura”.

RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

Este artículo presenta un resumen de algunas de las mediciones de nivel sonoro de 24/7, registradas durante la pandemia por la COVID-19, en el periodo inicial de encerramiento, del 20 de abril al 31 de mayo de 2020 (en las fases 2 y 3 de la pandemia), y durante el inicio del periodo de primera apertura, del 1 de junio al 8 de agosto de 2020, considerándose el fin de este periodo la llegada del huracán Hanna a la región (25 de julio de 2020)⁹ que generó cambios notorios en las condiciones meteorológicas, sociales y acústicas desde el 18 de julio de 2020, cuando el gobierno estatal de Nuevo León ordenó, entre otras medidas preventivas, la suspensión de transporte público en la ciudad. Pasado este evento se inició un largo periodo posterior de modificaciones caóticas en las medidas preventivas contra la COVID-19.

A continuación se presentan los resultados y posteriormente en la discusión se harán comparaciones y se presentarán observaciones de campo pertinentes.

RESULTADOS DURANTE EL ENCERRAMIENTO INICIAL

Durante lo que se denominó el encerramiento inicial, o en algunas publicaciones el primer confinamiento, se realizaron mediciones durante seis semanas, desde el 20 de abril de 2020 en la fase 2 de la pandemia y a partir del 21 de abril al 31 de mayo de 2020 en fase 3.

Con los registros sonoros obtenidos durante el encerramiento, se construyeron graficas del nivel sonoro contra el tiempo en las cuales se pueden observar las variaciones de niveles sonoros a lo largo del día. Para poder inferir el comportamiento diario del nivel sonoro se construyeron las gráficas que se muestran en la figura 3, las cuales corresponden con los niveles por cada segundo ($L_{Aeq,1s}$) desde el 20 de abril al 31 de mayo de 2020.

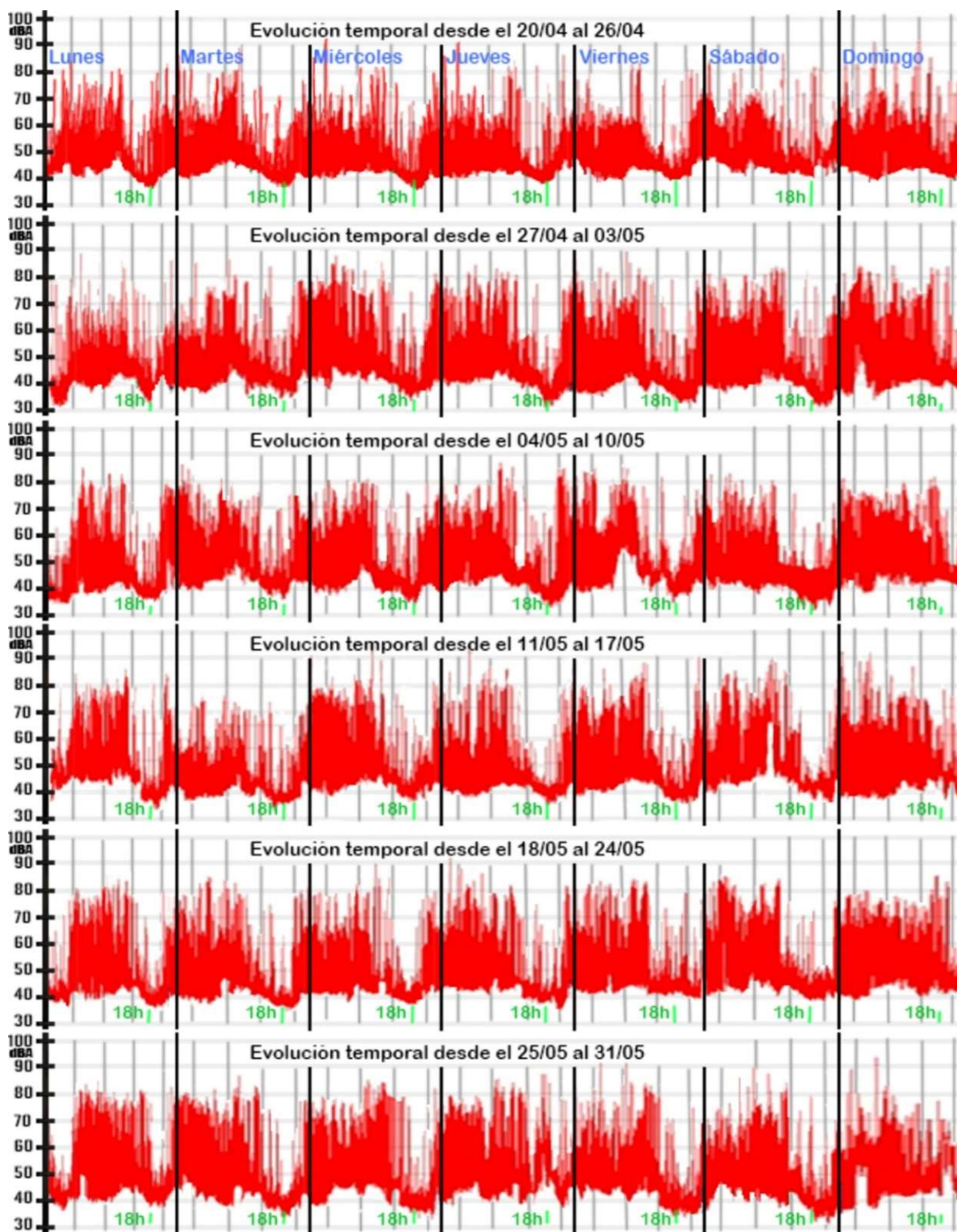


Fig. 3. Registros de los niveles sonoros en dBA por segundo ($L_{Aeq,1s}$) durante el primer encerramiento por la COVID-19.

En esas gráficas se puede ver la variabilidad del nivel sonoro dependiendo de la hora del día, y los eventos esporádicos que producen algunos niveles sonoros máximos. Es notable cómo los niveles sonoros en general bajan lentamente desde aproximadamente las 19:00 h, produciéndose los niveles sonoros más bajos entre las 4:00 h y las 5:00 h de la madrugada y aumentan abruptamente a partir de aproximadamente las 5:30 h de la mañana. También es posible ver niveles máximos de sonido, los cuales son producidos principalmente por: silbato de locomotoras, perros ladrando, audio del hogar, electrodomésticos de casa y jardín, así como por truenos atmosféricos.

Durante esta etapa de confinamiento y de distanciamiento social, no hay tanta diferencia entre los días de trabajo y los días de fin de semana debido a que las personas están todo el día en sus casas y casi todos los eventos de fin de semana fueron prohibidos. Se puede observar que en los primeros días del confinamiento, los niveles de ruido tanto internos como externos disminuyen notablemente, pero a como avanzaban los días el clima de ruido aumenta, esto debido principalmente a la generación de ruido dentro de la casa.

Los niveles sonoros máximos de ruido generados externamente permanecen aproximadamente con los mismos niveles, como en el caso de los trenes, aunque con una reducción en la frecuencia de ocurrencia. En la figura 4 se muestra la historia temporal del paso del tren (a aproximadamente 400 m de distancia del micrófono sin línea directa de vista, figura 5). Considerando que se trata de una zona urbana, es evidente el abuso en el manejo del silbato de las locomotoras al acercarse a un cruce con vehículos que no cuenta con barreras de control de tráfico.

Al no haber línea de vista directa, según las condiciones climatológicas el sonido del tren era más o menos molesto, al modificarse la trayectoria atmosférica y el espectro del sonido. Por otro lado, al disminuir el ruido de fondo en la ciudad los niveles sonoros altos se volvieron más notorios y molestos.

Otra fuente de ruido alto, de carácter aleatorio, fueron los sonidos relacionados con tormentas: lluvias intensas, vientos fuertes y por supuesto los truenos por relámpagos. En la figura 6 se muestra el registro sonoro del día 8 de mayo de 2020 durante una tormenta y en la figura 7 el reporte climático del mes.

El 1 de junio de 2020, las autoridades decretaron el fin del primer encerramiento, autorizándose algunas actividades económicas no esenciales, pero la prohibición sobre muchas otras se mantuvo, además de continuar “en línea” las actividades educativas en todos sus niveles.

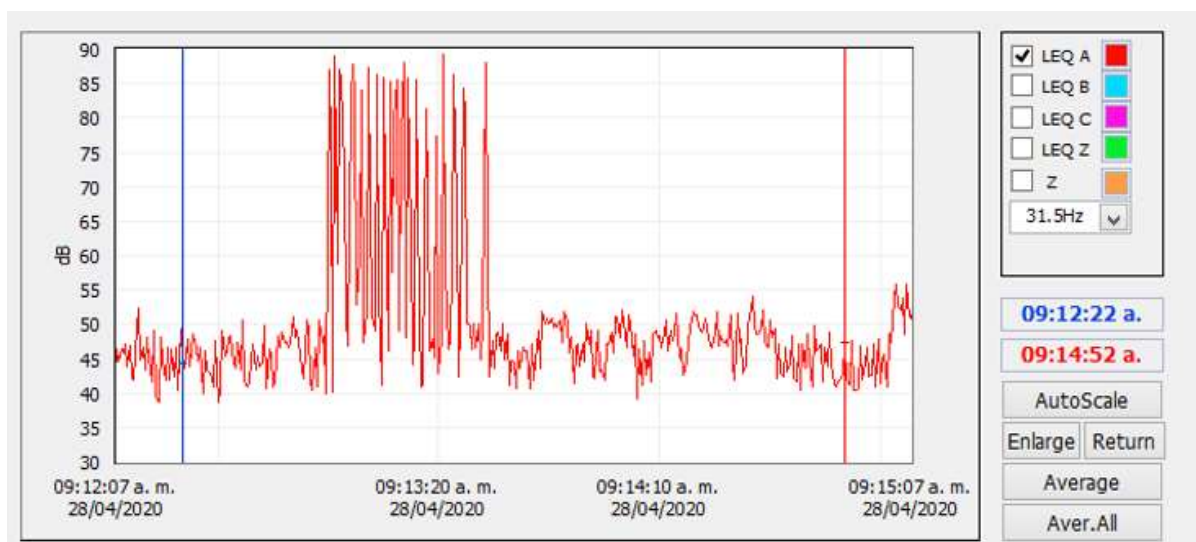


Fig. 4. Registro del paso del ferrocarril usando su silbato repetidamente el día 28 de abril de 2020, alrededor de las 9:00 h.



Fig. 5. El micrófono del sistema de medición sonoro está aproximadamente 400 m del cruce de ferrocarril sin línea de vista.⁷

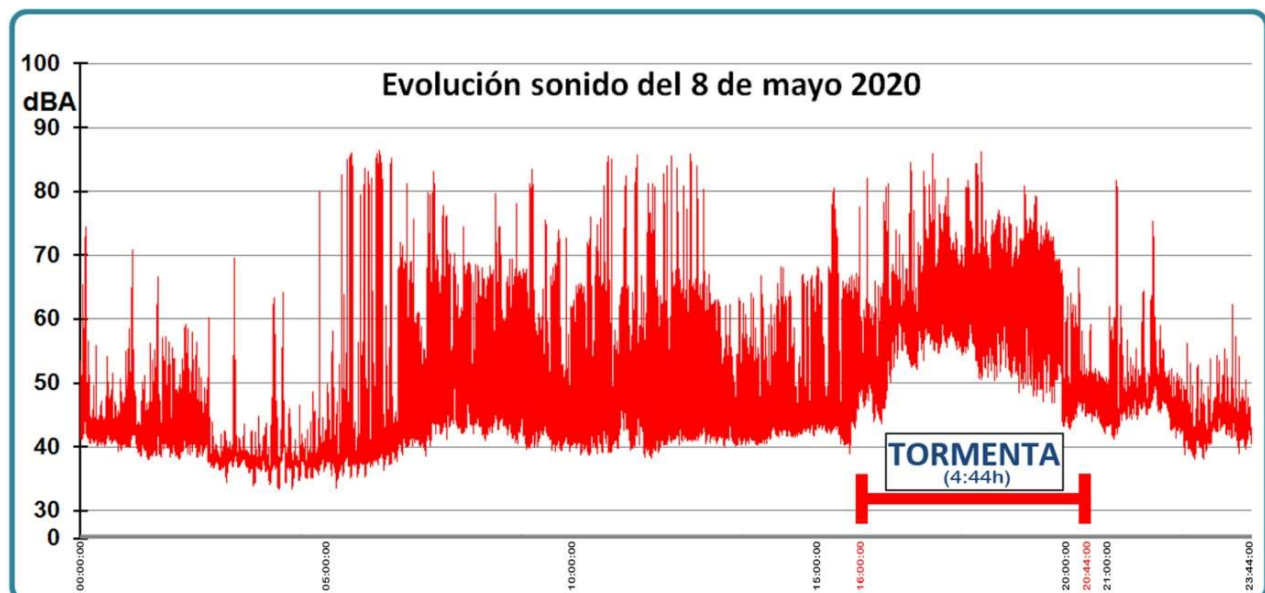


Fig. 6. Registro sonoro del día 8 de mayo de 2020 ($L_{Aeq,0.5s}$), ocurriendo entre aproximadamente las 16:00 h y las 20:00 h una tormenta con lluvia fuerte, rayos y truenos.

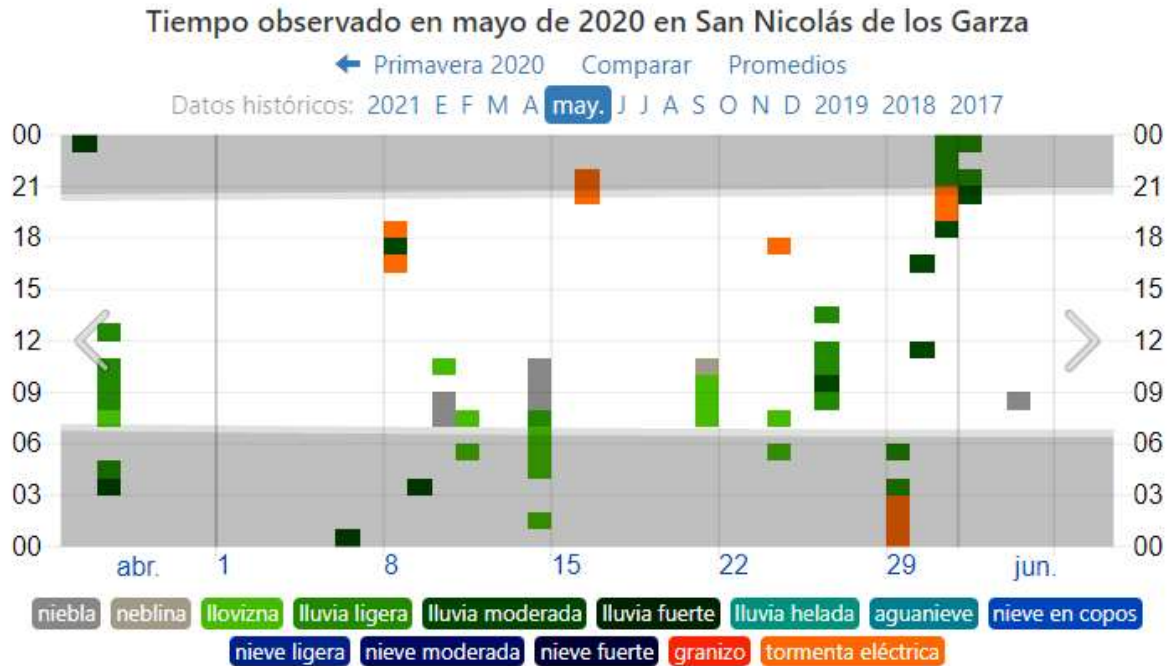


Fig. 7. Reporte climatológico del mes según.¹⁰

RESULTADOS DURANTE LA PRIMERA APERTURA

En la figura 8 se presentan gráficas de los niveles sonoros por segundo ($L_{Aeq,1s}$) del 1 de mayo al 12 de julio de 2020, periodo seleccionado (mismo número de días) para comparar con los datos del periodo de encerramiento inicial. A partir de estas gráficas se puede observar que durante la primera semana de este periodo de apertura empieza a subir el ruido de fondo y luego el patrón de comportamiento durante el día permanece fluctuando sin ningún patrón obvio reconocible, esto acorde con las políticas establecidas para una supuesta reapertura ordenada, la cual se vio afectada por la falla en el apego de la población a políticas que obedecieron a presiones sociales relacionadas con la opinión pública sobre la gravedad de la pandemia, la económica y la de salud, así como la falta de seguimiento gubernamental para hacerlas efectivas. El resultado de esta situación se puede relacionar con los contagios y fallecimientos cuyo registro se muestra en la figura 9.

Las fuentes de ruido antes mencionadas continuaron influyendo en el registro del nivel sonoro y aparecen incrementos en el nivel del ruido de fondo por periodos horarios específicos, esto a consecuencia, por ejemplo, del uso de ventiladores portátiles con motivo del inicio de la temporada de calor (primavera y verano). En las figuras 10 y 11 se muestran los registros de los días 8 y 9 de junio de 2020, donde son notorios los periodos en que un ventilador portátil estuvo cerca del punto de medición, aumentando el nivel sonoro de fondo.

Durante este periodo aparece con mayor frecuencia un factor muy importante que viene a explicar algunos de los cambios tan bruscos en el clima de ruido ($L_{10}-L_{90}$), tanto en encerramiento como en primera apertura. Este factor fue el uso de equipos de sonido, esto es: equipos audiovisuales, de audio, karaokes, etc., que emitieron sonido principalmente musical. Estos equipos se volvieron una fuente de alivio a las afectaciones al estado de ánimo producidas por las campañas de prevención contra la COVID-19.

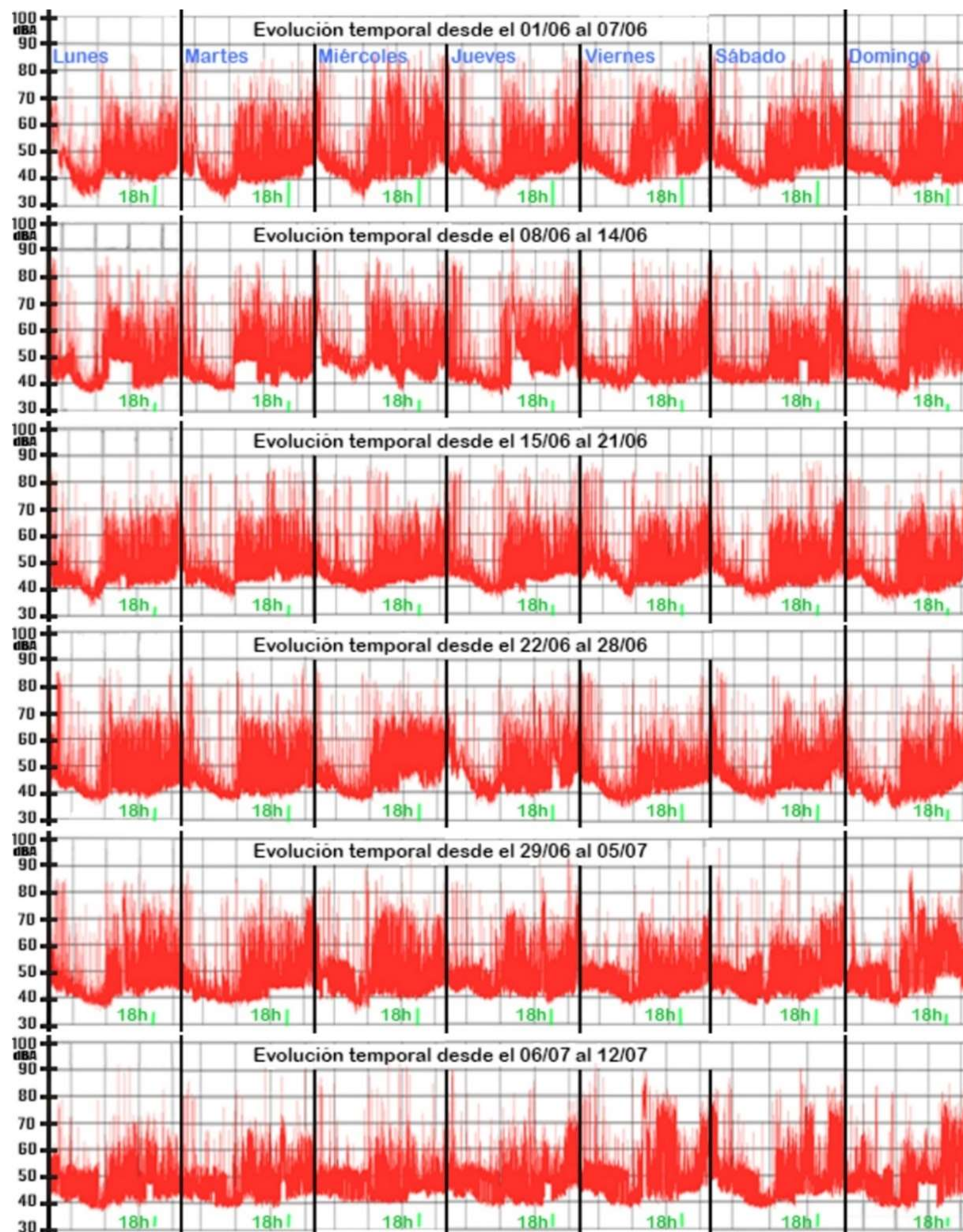


Fig. 8. Registros de los niveles sonoros en dBA por segundo ($L_{Aeq,1s}$) durante el periodo de primera apertura por la COVID-19, entre el 1 de junio y el 12 de julio de 2020.

Estos, en la casa monitoreada, fueron un alivio a la presión psicológica propia de los encierros prolongados. Comparando el clima de ruido en ambas etapas se puede notar en las figuras 3 y 8 como hay diferencias significativas en el clima de ruido sobre todo en el día.

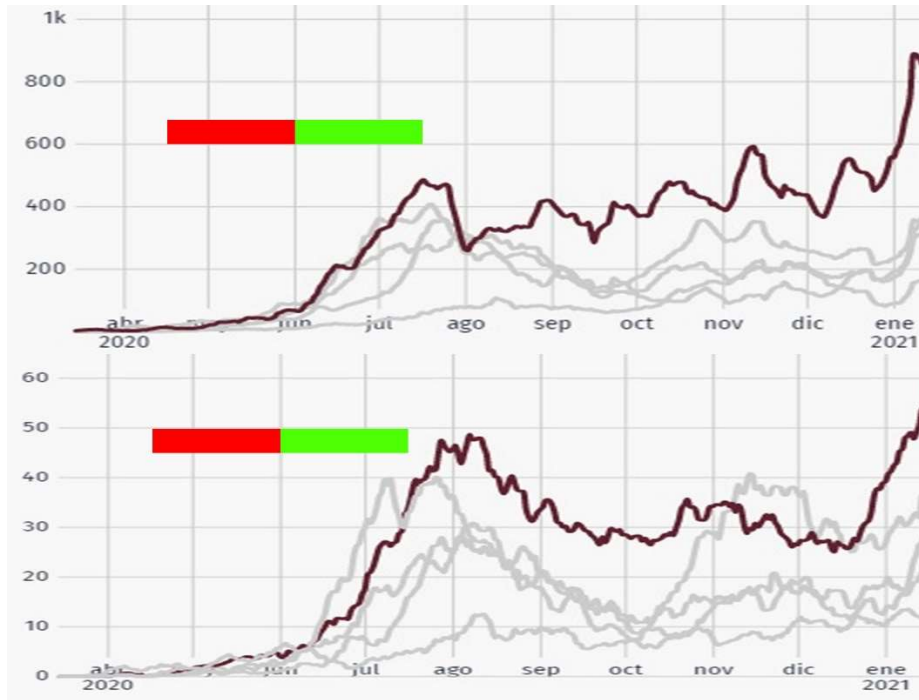


Fig. 9. Graficas de casos positivos y muertes diarias por la COVID-19 en el Estado de Nuevo León (línea oscura-café) durante los periodos considerados para este estudio. La línea roja indica el periodo de encerramiento (del 18 de abril al 31 de mayo de 2020) y la verde la de primera apertura (del 1 de junio al 14 de julio de 2020).¹¹

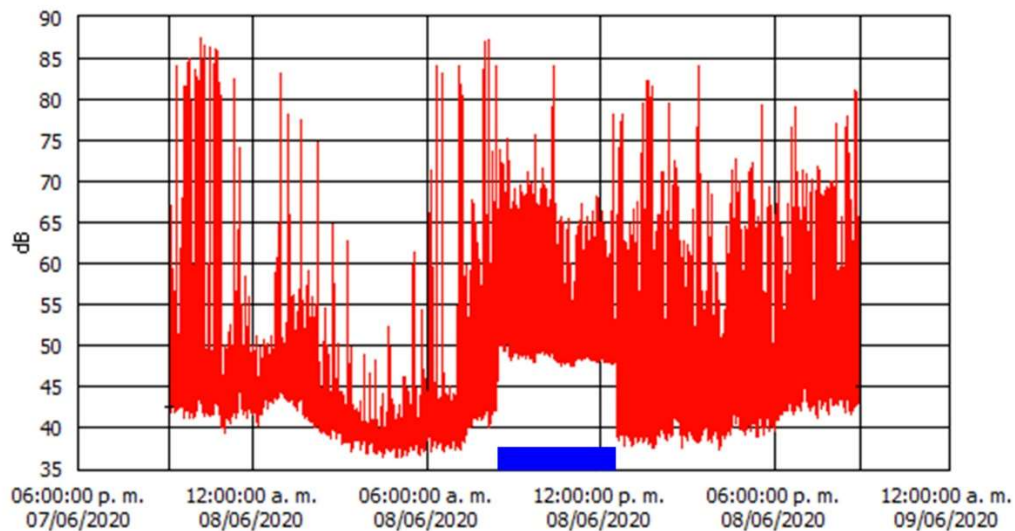


Fig. 10. Registros sonoros ($L_{Aeq,1s}$) del 8 de junio de 2020, en los que se puede observar el efecto en el ruido de fondo generado por ventiladores portátiles usados para mitigar el calor.

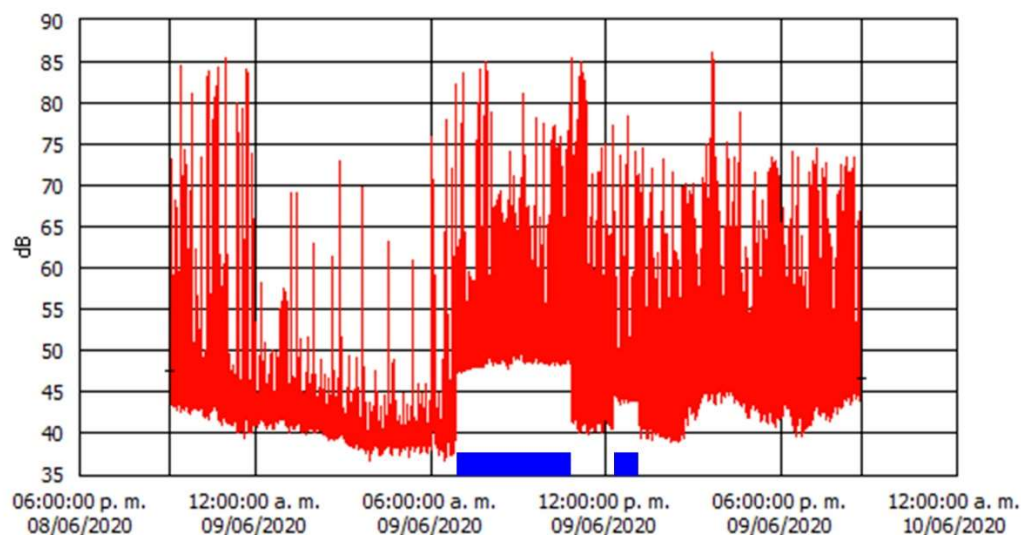


Fig. 11. Registros sonoros ($L_{Aeq,1s}$) del 9 de junio de 2020, en los que se puede observar el efecto en el ruido de fondo generado por ventiladores portátiles usados para mitigar el calor.

Estas situaciones de aumento sonoro por la asiduidad en el uso de equipos electrónicos de vídeo y audio por periodos variables, o incluso el uso de karaoke sin micrófono, generaban una sensación acústica de actividad y normalidad que compensa la sensación de aislamiento por el encerramiento, y en otros casos, normalmente en reuniones y fiestas familiares internas, como solución a la falta de fiestas y reuniones sociales, las cuales fueron prohibidas por la autoridad.

DISCUSIÓN

Para fines de comparar las diferencias en los niveles sonoros en los periodos considerados, encierro inicial y primera apertura, en la tabla I se muestran los niveles sonoros promedio para diferentes parámetros de medición.

Tabla I. Comparación de los niveles sonoros promedio para diferentes parámetros evaluados para los periodos considerados en este artículo: encierro (del 18 de abril al 31 de mayo de 2020) y primera apertura (desde el 1 de junio al 14 de julio de 2020).

PARÁMETRO	ETAPA	PROMEDIO	DIFERENCIA dBA
$L_{Aeq,T}$ x hora	Encierro	54.1	+0.9
	Primera apertura	55.0	
L_1 x hora	Encierro	63.2	+1.3
	Primera apertura	64.5	
L_{10} x hora	Encierro	52.6	+0.2
	Primera apertura	52.8	
L_{90} x hora	Encierro	42.7	+0.2
	Primera apertura	42.9	
$L_{A,Dia}$ ISO	Encierro	58.8	+0.5
	Primera apertura	59.3	
$L_{A,E}$ tarde ISO	Encierro	60.0	+1.9
	Primera apertura	61.9	
$L_{A,Noche}$ ISO	Encierro	49.9	+5
	Primera apertura	54.9	
$L_{A,Dia}$ MX	Encierro	59.8	+1.5
	Primera apertura	61.3	
$L_{A,Noche}$ MX	Encierro	50.1	+5
	Primera apertura	55.1	
$L_{10}-L_{90}$: Clima de ruido	Encierro	9.9	-0.1
	Primera apertura	9.8	

De la tabla I puede observarse que en general, después del encerramiento, con la primera apertura, los niveles sonoros aumentaron, alrededor de 1 dBA durante el día, y 5 dBA durante la noche. Y que el clima de ruido L_{10} - L_{90} prácticamente quedó igual. Estos resultados son coherentes con el hecho de que, aunque el ruido de fondo externo a las casas disminuyó, el sonido dentro de las casas aumentó por el número de personas durante el día en casa y muy importante por la necesidad de crear una sensación de no cambio y compañía sonora, la cual funcionó como un paliativo a los efectos psicológicos creados por el aislamiento y encerramiento en las personas.

Los resultados de las mediciones durante el encerramiento inicial con respecto a la primera apertura se compararon (considerando igual número de días) mediante análisis de varianza, ANOVA, encontrándose que existía un cambio significativo, entre los resultados de cada periodo, sólo para algunos parámetros, como se muestra (subrayados en verde) en la tabla II, siendo:

- Alfa=0.05;
- $H_0: M_1 = M_2$;
- $H_1: M_1 \neq M_2$ “Hay diferencia”

Tabla II. Análisis de varianza, ANOVA, entre muestras de diferentes parámetros sonoros en condiciones de encierro (del 18 de abril al 31 de mayo de 2020) y primera apertura (del 1 de junio al 14 de julio de 2020).

Parámetro	Etapas	Promedio	F	Probabilidad	Valor crítico para F	Hipótesis que se acepta
$L_{Aeq,T}$ x hora	Encierro	54.1	8.7611	0.0031	3.845869744	H1
	Primera apertura	55.0				
L_1 x hora	Encierro	63.2	11.6183	0.0006	3.845869744	H1
	Primera apertura	64.5				
L_{10} x hora	Encierro	52.6	0.2245	0.6356	3.845869744	H0
	Primera apertura	52.8				
L_{90} x hora	Encierro	42.7	1.8507	0.1738	3.845869744	H0
	Primera apertura	42.9				
$L_{A,Día}$ ISO	Encierro	58.8	0.3455	0.5582	3.951882408	H0
	Primera apertura	59.3				
$L_{A,E}$ tarde ISO	Encierro	60.0	9.5735	0.0026	3.951882408	H1
	Primera apertura	61.9				
$L_{A,Noche}$ ISO	Encierro	49.9	52.4385	1.76143×10^{-10}	3.951882408	H1
	Primera apertura	54.9				
$L_{A,Día}$ MX	Encierro	59.8	6.4758	0.0127	3.951882408	H1
	Primera apertura	61.3				
$L_{A,Noche}$ MX	Encierro	50.1	43.5079	3.27885×10^{-9}	3.951882408	H1
	Primera apertura	55.1				
L_{10} - L_{90} : Clima de ruido	Encierro	9.9	0.1179	0.7313	3.845869744	H0
	Primera apertura	9.8				

Si bien en varios de los parámetros medidos se encontraron diferencias adjudicables al cambio de políticas entre encerramiento y primera apertura, las diferencias entre los valores promedio fueron pequeños. El efecto de reducción de ruido a consecuencia del encerramiento fue mayor y evidente para las mediciones nocturnas.

Para visualizar esta tendencia se grafican en la figura 12 los niveles sonoros con ponderación “A” equivalentes para el horario nocturno ($L_{A,Noche}$) según el criterio horario ISO (entre las 22:00 h y 6:00 h) por cada día en ambos periodos considerados. Aunque se observa que los niveles sonoros equivalentes diarios para las mediciones nocturnas eran muy fluctuantes, esto por lo variante de las políticas y el comportamiento de las personas, al obtenerse las tendencias por periodo (línea de trazo verde) se nota claramente como en el encerramiento tendía a la horizontal y al realizarse la primera apertura la tendencia fue al aumento del nivel sonoro durante la noche.

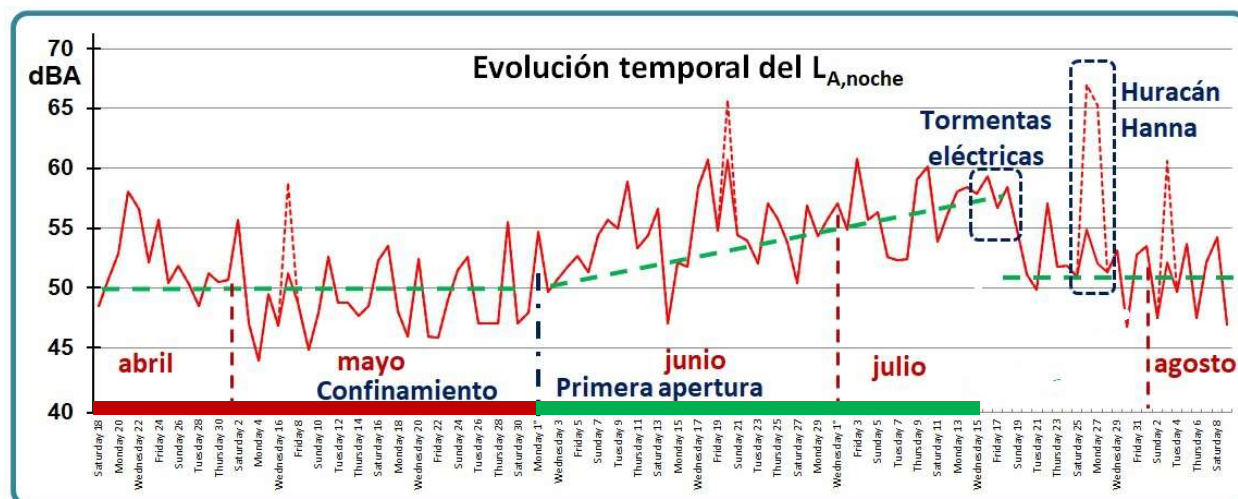


Fig. 12. Niveles sonoros equivalentes para el horario nocturno entre las 22:00 h y 6:00 h ($L_{A, \text{noche}}$) por cada día, del 18 de abril al 9 de agosto de 2020. Se grafican como líneas verdes de trazo las tendencias para cada periodo. Días antes de la llegada del huracán Hanna se vuelven a aplicar encerramiento y restricciones fuertes, incluso al transporte público, produciéndose una baja en el nivel sonoro.

Es importante observar la abrupta reducción de ruido a partir del 18 de julio de 2022, regresándose casi a los niveles de sonido nocturno durante el encerramiento inicial, lo cual se explica en base a cambios de políticas que establecen de facto un encerramiento con la excusa de la próxima llegada del huracán Hanna,⁹ pero también por volverse evidente el inicio de un pico de contagios y muertes (ver figura 9) por la COVID-19.

OBSERVACIONES DE CAMPO Y COMENTARIOS FINALES

Al momento de la instalación de la estación de monitoreo (en abril de 2020), se consideró que no se alteraría la vida familiar. Hubo algunas consideraciones e hipótesis que resultaron ciertas y otras que no lo fueron. Lo que se pensaba que iba a ser un monitoreo de corto plazo, una pandemia que se controlaría en poco tiempo, se convirtió en un proyecto a mediano plazo. Se tenía pensado comparar las mediciones durante el encierro con el “retorno a la normalidad” y se transformó en algo que deberá compararse con lo que el gobierno de México llama “una nueva normalidad” que, al publicarse este artículo, aún está por llegar.

En las etapas consideradas en este estudio, se observaron algunos aspectos destacables: Se percibió que el ruido de la ciudad disminuyó en términos acústicos, las aves se hicieron notablemente más presentes y activas; el ruido de la ciudad y el ruido de fondo disminuyó; el número de formaciones del ferrocarril fue reducido, pero el sonido de su silbato fue más molesto pues su nivel no cambió pero sí el nivel de ruido de fondo principalmente en horas nocturnas; la cantidad de aeronaves y helicópteros que sobrevolaron se redujo considerablemente; la disminución de las sirenas de la policía y las ambulancias también fue notoria (y gratificante); se redujo el ruido generado por la gente del vecindario; el sonido de los vehículos ruidosos disminuyeron notablemente.

Se volvió común que sonidos que antes no molestaban se volvieran un problema al tornarse evidentes con la disminución de los niveles sonoros y cambios en el espectro de frecuencias en el ruido de fondo.

Por otro lado, el ruido humano en los hogares durante las horas diurnas no cambió mucho debido al confinamiento y al trabajo en línea en el hogar. Durante el periodo de tiempo considerado para el monitoreo, la convivencia con equipos de audio a alto volumen fue, y sigue siendo al momento, una herramienta muy valiosa para superar los efectos psicológicos del confinamiento. El ruido dentro de las viviendas durante la noche disminuyó notablemente.

AGRADECIMIENTOS

El autor quiere agradecer al Dr. Jaime Castillo Elizondo, exdirector, y al Dr. Arnulfo Treviño Cubero, actual director de FIME-UANL; y a Walter A. Montano, de ARQUICUST en Argentina, por su apoyo a este trabajo.

REFERENCIAS

1. Organización Mundial de la Salud. Tabla 1: Niveles de preparación para los periodos inter-pandémico, pandémico y post-pandémico <https://www.who.int/csr/resources/publications/influenza/tablaspreparacionpandemia.pdf>.
2. Unioviado. Línea temporal de epidemias históricas. <https://www.unioviado.es/epidemia/index.php/linea-del-tiempo-de-las-epidemias/>
3. Berglund B., Lindvall T. (1995) Community noise. WHO. Geneva.
4. ISO 1996 Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 1: Basic quantities and assessment procedures. Part 2: Determination of sound pressure levels.
5. Norma Oficial Mexicana NOM-081-SEMARNAT-1994 que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD02/081.pdf>
6. Fernando J. Elizondo-Garza y Walter A. Montano. Monitoreo sonoro en casa habitación en San Nicolás, N.L. México, durante el confinamiento y primera apertura por la pandemia de la COVID-19. 26º Congreso Internacional Mexicano de Acústica, en línea, 11 y 12 noviembre 2021.
7. Google Earth 25°45'19.43", -100°18'19.51".
8. BSWA308 (2020) Sound level meter. BSWA Technology Co. R. P. of China. https://www.bswa-tech.com:8443/web_proDetail.action?proId=412.
9. Wiki. Huracán Hanna (2020). [https://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Hanna_\(2020\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Hanna_(2020))
10. Weather Spark. El tiempo durante todo el año en cualquier lugar del mundo. <https://es.weatherspark.com/h/m/5148/2020/5/Tiempo-hist%C3%B3rico-en-mayo-de-2020-en-San-Nicol%C3%A1s-de-los-Garza-M%C3%A9xico#Figures-ObservedWeather>
11. DataMÉXICO. COVID-19. <https://staging.datamexico.org/es/profile/geo/nuevo-leon-nl?covidSelector=positiveDailyOption>

Colaboradores

Baro Tijerina, Manuel

Researcher-professor in the Industrial and Manufacturing Department at the technological institute of Nuevo Casas Grandes, Mexico, He completed his Engineering career in Industrial and System at the ITSNCG. After concluding his master's degree in Industrial Engineering at Autonomous University of Ciudad Juárez, México, getting the highest mark. By last he completed his Technology PhD in 2020 getting also the highest mark. ORCID: 0000-0003-1665-8379.

Cázares Ramírez, Ricardo Isaac

Es profesor de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa y miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

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 Garza, Fernando Javier

Ingeniero Mecánico Electricista (1976 UANL/FIME), Diplomado Especialización en Administración de Tecnología (1981 CINVESTAV/IPN), MC Ingeniería Ambiental (1993 UANL/FIC). Catedrático desde 1973 y Profesor Emérito de la UANL desde 2006. Líneas de investigación: acústica, ruido y vibraciones. Obtuvo: Premio Nuevo León de Ecología 2002 y Medalla Monterrey al Mérito Ecológico 2007.

García Ramírez, Pedro Javier

Ingeniero Industrial en Electrónica por ITVER. MC. en Microelectrónica por el INAOE; Doctorado en Microeléctrica por INAOE. Profesor de Tiempo Completo en la FIEE-UV; responsable del Cuerpo Académico Dinámica de Sistemas; Miembro del SNI I. Áreas de Interés: Análisis, Modelado, Simulación, Instrumentación y Control de Sistemas Dinámicos aplicando Tecnologías Emergentes.

Piña-Monarez, Manuel R.

Researcher-professor in the Industrial and Manufacturing Department at the Autonomous University of Ciudad Juárez, México. He completed his PhD. in Science in Industrial Engineering in 2006 at the Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, México. He had conducted research on system design methods including robust design, reliability and multivariate process control. He is member of the National Research System (SNI), of the National Council of Science and Technology (CONACYT) in México. ORCID: 0000-0002-2243-3400.

Platas-Garza, Miguel Ángel

Doctor en ingeniería eléctrica por la Universidad Autónoma de Nuevo León en 2011. Actualmente es profesor titular en la misma institución. Es miembro del SNI con la distinción de Nivel I. Sus intereses académicos se encuentran relacionados a procesamiento de señales.

Polo Labarrios, Marco Antonio

Se ha desempeñado como Profesor e Investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana (unidades Iztapalapa y Cuajimalpa) y en la Universidad

Iberoamericana. Actualmente es profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México y pertenece al Sistema Nacional de Investigadores desde enero de 2018.

Posadas-Castillo, Cornelio

Ingeniero en Control y Computación (1997) por FIME de la UANL. Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones por el CICESE en 2001; Doctorado en Ciencias Eléctricas por la UABC en 2008. Desde 1997 es Profesor de Tiempo Completo en la FIME-UANL. Miembro del SNI I.

Quezada García, Sergio

Es profesor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Pertenecer al SNI desde enero de 2018.

Rodríguez-Cruz, José Ramón

Coordinador de la maestría en ingeniería con orientación en Telecomunicaciones. Profesor Asistente del ITESM de 2001 a 2011. Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica CINVESTAV-IPN 2000, MAESTRÍA en ciencias de la ingeniería eléctrica en UTA/USA 1995. Ingeniero en Computación por la UAG en 1992.

Rodríguez Cruz, Francisco Antonio

Fue estudiante en el programa Ingeniero en Electrónica y Automatización en la FIME-UANL.

Rodríguez-Liñan, Angel

Doctor en Ingeniería Eléctrica (2009) por la UANL, pertenece al Cuerpo Académico Tecnología e Innovación Mecatrónica. Desde 2009 es Profesor de Tiempo Completo en la FIME, UANL. Obtuvo el Premio de Investigación UANL 2009. Desde 2011 fue reconocido por PRODEP y SNI. Sus áreas de interés son análisis, estimación, instrumentación y control en sistemas dinámicos, robótica y biomecatrónica.

Sánchez Mora, Heriberto

Se graduó de la licenciatura en Ingeniería en Energía por la Universidad Autónoma de Metropolitana unidad Iztapalapa, y obtuvo sus estudios de maestría en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Actualmente estudia el Doctorado en Ciencias Fisicomatemáticas en el Instituto Politécnico Nacional.

Zambrano-Serrano, Ernesto

Doctor en Control y Sistemas Dinámicos por el IPICYT (2017). En 2018 realizó una estancia posdoctoral en la FCE-BUAP. De 2019-2021 realizó una estancia posdoctoral en la FIME-UANL. Actualmente es profesor en el departamento de control de la FIME-UANL, es miembro del SNI-CONACYT y de la Sociedad Mexicana de Matemáticas.

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