

Ingenierías

ISSN 1405-0676

91

ada a circuito RC

50



Chart



V. capacitor



Paro



JULIO - DICIEMBRE 2021, Vol. 24, No. 91

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

- 3 Análisis de armónicas dinámicas con filtros de
respuesta impulsional finita diseñados con O-splines**
José Antonio De la O Serna

- 22 Comportamiento de orden fraccionario en la respuesta
de un circuito RC mediante derivada de núcleo singular**
Ernesto Zambrano-Serrano, Miguel A. Platas-Garza,
Alejandro E. Loya-Cabrera, Guadalupe E. Cedillo-Garza,
Cornelio Posadas-Castillo

- 33 Explorando el océano a través de paisajes sonoros**
Jennifer L. Miksis-Olds, Bruce Martin, Peter L. Tyack

- 49 Características higroscópicas de ocho
maderas mexicanas**
Javier Ramón Sotomayor-Castellanos, Israel Macedo-Alquicira,
Eduardo Mendoza-González

- 63 Colaboradores**

- 65 Información para colaboradores**

- 66 Código de ética**



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIME

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



Ingenierías

Ingenierías, Volumen 24, N° 91, julio-diciembre 2021. 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: 15 de julio de 2021. Tiraje: 800 ejemplares. Distribuido por: Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Pedro de Alba S/N, Edificio 7, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455.

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

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

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

DIRECTORIO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Mtro. Rogelio G. Garza Rivera
Rector

Dr. Santos Guzmán López
Secretario General

Mtra. Emilia Edith Vásquez Farías
Secretario Académico

Dr. Celso José Garza Acuña
Secretario de Extensión y Cultura

Lic. Antonio Ramos Revillas
Director de Editorial Universitaria

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

Dr. Arnulfo Treviño Cubero
Director

Dr. Juan Antonio Aguilar Garib
Editor responsable

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

Gregoria Torres Garay
Tipografía y formación

Ing. Cosme D. Cavazos Martínez
Webmaster

René de la Fuente Franco
Impresor

CONSEJO EDITORIAL INTERNACIONAL

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

CONSEJO EDITORIAL MÉXICO

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

COMITÉ TÉCNICO

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

Análisis de armónicas dinámicas con filtros de respuesta impulsional finita diseñados con O-splines

José Antonio De la O Serna

^AUniversidad Autónoma de Nuevo León,

^BFacultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

jose.delaostr@uanl.edu.mx

RESUMEN

Los splines son esenciales en procesamiento de señales. No solamente se usan en el muestreo e interpolación de señales, sino también en el diseño de filtros, en procesamiento de imágenes, y el análisis multiresolución. Aquí presentamos una nueva clase de splines. Se les llama O-splines porque sus nodos están separados por un ciclo fundamental. Se usan como muestreadores de estados óptimos, en el sentido de que sus coeficientes ofrecen en cada instante de tiempo las derivadas del segmento de señal que aseguran la mejor aproximación de Taylor alrededor de un punto, o la mejor interpolación de Hermite entre dos puntos. Los O-splines corresponden a la respuesta impulsional de los filtros de la Transformada de Tiempo Discreto de Taylor-Fourier (DTTFT). Los pasabajas coinciden con los núcleos centrales de interpolación de Lagrange, los cuáles convergen a la función Seno Cardenal, respuesta impulsional del filtro ideal. Y sus derivadas convergen a su vez a los diferenciadores ideales pasabajas. Los O-splines pasabanda son splines armónicos, pues son simples modulaciones de un pasabajas en cada frecuencia armónica. En este artículo se presenta la solución en forma cerrada de los O-splines pasabajas. Con ella se reduce enormemente la complejidad computacional de la DTTFT y se pueden obtener O-splines de orden elevado. Con ellos se pueden diseñar filtros pasabanda muy cercanos al ideal, en cualquier frecuencia. Los O-splines definen una escalera de espacios muy útiles para el análisis multiresolución, y el análisis tiempo-frecuencia. El artículo ilustra algunos ejemplos de diversa naturaleza. Por supuesto que una nueva familia de onduletas obtenidas a partir de los O-splines está en camino.

PALABRAS CLAVE

Splines cardenales, núcleo de interpolación central de Lagrange, Transformada de tiempo discreto Taylor-Fourier, señales oscilatorias, oscilaciones de potencia, análisis tiempo-frecuencia, análisis multiresolución, compresión de datos.

ABSTRACT

Splines are at the essence of signal processing. Not only in sampling and interpolation, but also in filter design, image processing, and multi-resolution analysis. A new class of splines is presented here. They are referred to as O-splines since their knots are separated by one fundamental cycle. They are used as optimal state samplers, in the sense that their coefficients provide the

derivatives for the best Taylor approximation to a given signal about a time instance or the best Hermite interpolation between two of them. They are the impulse response of the filters of the Discrete-Time Taylor-Fourier Transform (DTTFT) filter bank. Lowpass O-spline coincides with the Lagrange central interpolation kernel, which converges towards the ideal Sinc function. It comes with its derivatives which in turn converge to the ideal lowpass differentiator. The bandpass O-splines are harmonic splines since they are modulations of the former kernel at harmonic frequencies. In closed-form, they reduce the computational complexity of the DTTFT and can be used to design ideal bandpass filters at a particular frequency. By increasing the order they define a ladder of spaces very useful for multi-resolution and time-frequency analysis. Examples are provided at the end of the paper. Naturally, a new family of wavelets is coming soon from these splines.

KEYWORDS

Cardinal splines, central Lagrange interpolation kernel, Taylor-Fourier discrete time transform, oscillatory signals, power oscillations, time-frequency analysis, multi-resolution analysis, data compression.

INTRODUCCIÓN

Los splines^{1,2} están no solamente en la base de las operaciones del procesamiento de señales, tales como el muestreo y la interpolación, sino también en el diseño de filtros,³ el procesamiento de imágenes,⁴ y el análisis multi-resolución.⁵ Ellos se han aplicado igualmente en el diseño asistido por computadora, en computación gráfica para dibujar curvas suaves con curvatura mínima, y para reproducir modelos gráficos y representación de superficies.

Los splines más conocidos en procesamiento de señales son los B-splines.⁶⁻⁷ Los B-splines de orden m son continuos hasta la derivada $m - 1$. Esta propiedad garantiza juntas continuas. Tienen soporte compacto, pero no son spline cardenales. Sin embargo, ellos se encuentran en la base del marco matemático para el diseño de los splines cardenales de interpolación modernos, tales como los llamados B-splines exponenciales, o E-splines,^{8,9} o combinaciones lineales de ellos.

En esta investigación se obtuvo una nueva clase de splines. Los O-splines fueron obtenidos numéricamente en¹⁰ para analizar señales oscilatorias de sistemas de potencia. También han sido usados para analizar electro-encefalogramas.¹¹ Pero aquí se obtienen en forma cerrada para diseñar filtros pasa-banda y reducir la carga computacional en el análisis de señales de banda limitada.

Los O-splines son las respuestas impulsionales del banco de filtros de la transformada de tiempo discreto Taylor-Fourier (DTTFT).¹⁰ Ellos son las funciones duales de las del modelo de señal Taylor-Fourier, el cual no es más que la extensión de Taylor de la transformada de Fourier discreta (DFT), en el cual los coeficientes de Fourier se extienden a polinomios de Taylor. Se llaman O-splines porque sus segmentos son cíclicos, es decir sus nudos se separan en intervalos de un ciclo fundamental, y porque ofrecen coeficientes óptimos para la representación de las señales en el subespacio Taylor-Fourier.

Los O-splines en forma cerrada se obtienen mediante la factorización del

modelo de señal DTTFT en dos operadores: uno para los términos de Taylor, y el otro con las exponenciales complejas de Fourier en las frecuencias armónicas. En esta descomposición, los O-splines y sus derivadas se encuentran en los vectores de la matriz dual del operador de Taylor, y los O-splines pasabanda son simple modulaciones a las frecuencias armónicas de la matriz de Fourier.

Los O-splines pasabajas resultan ser los kernels de interpolación central de Lagrange, los cuáles son de soporte compacto y convergen a la función Seno Cardenal Sinc cuando el orden tiende a infinito.¹² En consecuencia su respuesta en frecuencia converge a la del filtro pasabajas ideal, y las de sus derivadas a las respuestas en frecuencia de los diferenciadores ideales.

Como los O-splines operan en la etapa de análisis en la matriz dual,¹³ funcionan como muestreadores de estados de la señal, es decir en cada instante de tiempo ofrecen muestras de la señal y de sus primeras derivadas, ofreciendo los coeficientes óptimos para la mejor aproximación de Taylor a la señal en la ecuación de síntesis. Esta es una diferencia importante con respecto a la mayoría de los splines, cuya literatura se consagra a su rendimiento como interpoladores.¹⁴ Esta característica distingue este trabajo de investigación de los encontrados en la literatura.

Los trabajos más recientes de splines cardenales de interpolación son sobre los splines de muchos nódulos MK-splines.¹⁵ Estos son filtros FIR simétricos con muestras en cada mitad de intervalo y obtenidos por combinaciones lineales de B-splines del mismo orden. Tienen dos trozos polinomiales por intervalo unitario con el doble de nudos (de ahí su nombre). Aun cuando MK- y O-splines tienen soporte compacto, los O-splines no tienen nada que ver con los B-splines. Su cardenalidad resulta directamente en el operador adjunto de la expansión Taylor-Fourier. En consecuencia, los O-splines son aplicados como operadores de muestreo, operación inversa a la de interpolación. Ellos obtienen los mejores coeficientes Taylor-Fourier, con significado físico de posición, velocidad y aceleración de la señal. Al estar en la base dual de un sistema biortogonal, establecen un proceso híbrido de análisis-síntesis. Estas son las principales distinciones de los O-splines, que los hacen únicos, óptimos, útiles, efectivos y eficaces.

Recientemente, los MK-splines fueron generalizados a los GMK-splines,¹⁶ una familia de splines obtenidos mediante la relajación a racionales de la mitad de intervalo de los MK. Aun cuando esta relajación produce algunos filtros con ganancias de paso no-planas, y otros con soporte fraccionario (no entero), los GMK splines de orden n tienen continuidad de orden $n-1$.

El modelo de señal DTTFT se concibió como una extensión del tradicional concepto de fasor (coeficiente de Fourier) al de fasor dinámico para capturar oscilaciones con mejor exactitud. Este modelo extendido corresponde al de señales en el $\text{span}\{t^n e^{j2\pi h F_1 t}\}_{h=-\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}-1; n=0, \dots, K}$ donde F_1 es la frecuencia fundamental, y N es el número de armónicas dentro de la banda delimitada por la frecuencia de muestreo. Esto corresponde al emphspan del conjunto de polos con multiplicidad $K+1$ en las N frecuencias armónicas.⁹ Bajo este aspecto, los O-splines son splines exponenciales con argumentos imaginarios, o splines de Fourier y cumplen con las propiedades y teoremas de los B-exponenciales en.⁸

La ecuación de síntesis de la DTTFT interpola un polinomio de Taylor del

orden del spline, sobre el intervalo del spline, pero con las derivadas estimadas también es posible hacer una interpolación de Hermite entre dos estados cíclicos consecutivos. El muestreador de estados dotado con un interpolador de Hermite ofrece un algoritmo de compresión óptima de señales oscilatorias y reduce el costo computacional con un error suficientemente pequeño controlado por el orden de los O-splines a la entrada y el grado del spline de Hermite a la salida.

En lo que sigue, el modelo de señal DTTFT se presenta en la Sección II. Los O-splines pasabajas se obtienen en forma cerrada en la Sección III, junto con sus derivadas y sus respuestas en frecuencia. Enseguida, los O-splines armónicos se establecen en la Sección mbox III-D mbox . Como resultados IV se usan los O-splines para analizar y reconstruir una senoidal, para eliminar el ruido de una oscilación de frecuencia variable de un sistema real de potencia,^{17, 18} y para separar los modos de oscilación de una forma de onda de presión sanguínea de un paciente.¹⁹ Finalmente se presentan las conclusiones del artículo.

TRANSFORMADA DE TIEMPO DISCRETO TAYLOR-FOURIER

Los O-splines de la DTTFT O-splines fueron presentados en¹⁰ en forma matricial. En el presente artículo se obtienen en forma cerrada. Esta formulación reduce la complejidad computacional y ofrece una secuencia de funciones cuyos espectros convergen al del filtro pasabajas ideal.

El modelo de señal Taylor-Fourier se obtiene relajando los coeficientes de Fourier a funciones temporales polinomiales de la forma, $\xi_h(t) = a_h(t)e^{j\varphi_h(t)}$, las cuales portan la *envolvente compleja* de cada frecuencia armónica h . Así, el modelo de señal extendido se expresa de la siguiente forma:

$$x(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} \xi_h(t) e^{j2\pi h F_1 t}, \quad -\frac{CT_1}{2} \leq t \leq \frac{CT_1}{2} \quad (1)$$

donde F_1 es la frecuencia fundamental en Hz , T_1 es el período ($T_1 = \frac{1}{F_1}$) en segundos, y C es el número de ciclos.

De esta forma, las armónicas se convierten en señales de banda angosta.²⁰ La envolvente compleja $\xi_h(t)$ en cada frecuencia armónica es entonces aproximada por el mejor polinomio de Taylor de grado K :

$$\xi_h^{(K)}(t) = \xi_h(t_0) + \dot{\xi}_h(t_0)(t - t_0) + \dots + \xi_h^{(K)}(t_0) \frac{(t - t_0)^K}{K!}, \quad (2)$$

en el sentido óptimo de mínimos cuadrados (LMS), en cada intervalo de observación de C ciclos, y centrado en el instante t_0 .

Al tomar N muestras por período fundamental, la ecuación de síntesis del subespacio DTTFT puede escribirse de (1) y (2) como sigue:

$$x = \Phi \xi \\ = \begin{pmatrix} 1 \\ j \\ \vdots \\ j^K \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_N \\ W_N \\ \vdots \\ W_N \end{pmatrix} T \begin{pmatrix} W_N \\ W_N \\ \vdots \\ W_N \end{pmatrix} \dots \frac{1}{K!} T^K \begin{pmatrix} W_N \\ W_N \\ \vdots \\ W_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_N \\ \xi_N \\ \vdots \\ \xi_N \end{pmatrix} \quad (3)$$

donde la matriz $\Phi (K+1) N \times (K+1) N$ contiene los vectores de la base vectorial del subespacio, y los subvectores $\xi_N^{(k)}$, $k = 0, 1, \dots, K$, contienen las derivadas de los fasores dinámicos de cada armónica $\xi_N(h)$ en (2). La submatriz $W_N N \times N$ es la matriz de Fourier de la transformada de Fourier Discreta (DFT) con columnas armónicas $w_h = e^{j \frac{2\pi}{N} hn}$; $h, n = 0, \dots, N-1$. Y finalmente la matriz diagonal

$T (K+1)N \times (K+1)N$ contiene las muestras del primer término de Taylor en el intervalo de $C=K+1$ ciclos fundamentales. Ver¹⁰ para más detalles de esta formulación.

Note en (3) que aumentando el orden de Taylor por uno, el tamaño del modelo aumenta por N , ya que cada término de Taylor afecta al conjunto de armónicas, y por tanto se requiere otro ciclo fundamental de datos al fondo de la matriz Φ . Note también que las matrices diagonales de Taylor (y sus potencias), operan productos Hadamard de los segmentos cíclicos en sus diagonales con las columnas de las matrices W_N .

En,¹⁰ se demostró que la matriz Φ puede factorizarse en dos:

$$\Phi = \Upsilon \Omega$$

$$= \begin{pmatrix} I & Y_1 & \dots & \frac{1}{K!} Y_1^K \\ I & Y_2 & \dots & \frac{1}{K!} Y_2^K \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I & Y_C & \dots & \frac{1}{K!} Y_C^K \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_N & 0 & \dots & 0 \\ 0 & W_N & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & W_N \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Esta factorización es posible gracias a que las columnas de W_N contienen un período fundamental. Las submatrices diagonales Y_c , $c = 1, 2, \dots, C$, $N \times N$, contienen muestras de segmentos cíclicos consecutivos de la matriz de Taylor T en (3). El producto Hadamard en (3) se obtiene en (4) bloque por bloque, de cada columna de submatrices en Υ , con las submatrices W_N en la diagonal de Ω , reconstruyendo las submatrices verticales de (3).

La siguiente ecuación ofrece los mejores coeficientes (Least Mean Squares, LMS) de la proyección de x sobre el subespacio Taylor-Fourier:

$$\hat{\xi} = \tilde{\Phi}^H x \quad (5)$$

en la cual $\tilde{\Phi}$ es la matriz dual de Φ ,²¹ dada por

$$\tilde{\Phi} = \Phi (\Phi^H \Phi)^{-1}, \quad (6)$$

Υ con $\Phi = \Upsilon \Omega$ en (4), se tiene:

$$\tilde{\Phi} = \Upsilon (\Upsilon^H \Upsilon)^{-1} \frac{\Omega}{N} = \tilde{\Upsilon} \frac{\Omega}{N}, \quad (7)$$

lo que indica que las columnas de $\tilde{\Phi}$ son modulaciones a las frecuencias armónicas de las columnas de submatrices diagonales en $\tilde{\Upsilon}$, es decir, las columnas de submatrices diagonales en $\tilde{\Upsilon}$ contienen las envolventes comunes (el O-spline y sus derivadas) de cada frecuencia armónica en W_N .

Ya que Υ es una matriz cuadrada invertible, su dual es simplemente la transpuesta de su inversa:

$$\tilde{\Upsilon} = \Upsilon^{-T} = \frac{Adj(\Upsilon)^T}{|\Upsilon|}, \quad (8)$$

la cual es simplemente la matriz de cofactores $Adj(\Upsilon)^T$ dividida por el determinante de Υ .

La multiplicación de submatrices diagonales Y_i^k en el operador de Taylor Υ produce el producto punto a punto de sus diagonales. En consecuencia, Υ se puede compactar en una matriz $C \times C$ sustituyendo cada submatriz Y_i^k por el k -ésimo término de Taylor como una función de tiempo evaluada en su correspondiente i -ésimo segmento. Así se puede obtener fácilmente la inversa de esa matriz compacta ya que esas funciones actúan como cofactores en la inversión.

En la siguiente sección se obtienen en forma cerrada los O-splines pasabajas de orden K y sus primeras derivadas de el numerador en (7) cuando cada

submatriz WN en Ω se reduce a su primer vector columna de unos. Se denota con Φ_0 la submatriz resultante, ya que esa operación convierte las diagonales en cada renglón de Φ en un vector que concatena dichas diagonales en un polinomio a trozos, es decir, en un spline. Las diagonales en las submatrices del primer renglón ofrecen el O-spline pasabajas, y las de los renglones subsecuentes en sus primeras derivadas. Los O-splines armónicos o pasabanda serán simplemente modulaciones de los pasabajas en cada frecuencia armónica.

O-SPLINES PASABAJAS EN FORMA CERRADA

En las siguientes subsecciones se obtienen los O-splines pasabajas y sus primeras derivadas en Φ_0 mediante la solución en forma cerrada de la matriz inversa de Φ en (8) y concatenando los pedazos polinomios de cada vector de Φ_0 .

Para $K=0$, se tiene: $t_1 = t_{[-\frac{T_1}{2}, \frac{T_1}{2})}$ y $\Phi_0^{(0)} = 1$, y por tanto $\tilde{\Phi}_0^{(0)} = 1$. El sistema es ortogonal y el O-spline es el pulso rectangular.

$$\tilde{\Phi}_0^{(0)}(t) = \begin{cases} 1 & -\frac{T_1}{2} \leq t \leq \frac{T_1}{2}, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

Para $K=1$, $t_1 = t_{[-T_1, 0)}$, y $t_2 = t_{[0, T_1)} = t_1 + T_1$, tenemos

$$\Phi_0^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

con $|\Phi_0(1)| = t_2 - t_1 = T_1$. Entonces se tiene:

$$\tilde{\Phi}_0^{(1)} = \frac{\begin{pmatrix} t_2 & -1 \\ -t_1 & 1 \end{pmatrix}}{T_1} = \begin{pmatrix} u_1 + 1 & -F_1 \\ -(u_2 - 1) & +F_1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

donde u_n es el tiempo normalizado $u = t_n/T_1$. Sus columnas forman el pulso rectangular:

$$\tilde{\Phi}_0^{(1)}(u) = \begin{cases} u + 1 & \text{for } -1 \leq u < 0, \\ 1 - u & \text{for } 0 \leq u < 1, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (12)$$

y la onduleta de Haar: $-F_1 \tilde{\Phi}_0^{(1)}(u)$.

Para $K=2$, tenemos

$$\Phi_0^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 & t_1 & t_1^2/2 \\ 1 & t_2 & t_2^2/2 \\ 1 & t_3 & t_3^2/2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

con $t_1 = t_{[-\frac{3T_1}{2}, -\frac{T_1}{2})}$, $t_2 = t_1 + T_1$, y $t_3 = t_1 + 2T_1$. En este caso $|\Phi_0^{(2)}| = T_1^3$, y

$$\tilde{\Phi}_0^{(2)} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(u_1 + 2)(u_1 + 1) & -F_1(u_1 + \frac{3}{2}) & F_1^2 \\ -(u_2 + 1)(u_2 - 1) & 2F_1 u_2 & -2F_1^2 \\ \frac{1}{2}(u_3 - 1)(u_3 - 2) & -F_1(u_3 - \frac{3}{2}) & F_1^2 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

Note en (11) y (14), que es suficiente con calcular la primera columna de la matriz dual, ya que las siguientes son el negativo de la derivada de la precedente escalada por factores constantes. De hecho, como el primer vector columna es simétrico, solamente se requiere su primera mitad para obtener todos los vectores restantes.

De (13) se puede ver que $\Phi_0(K)$ es una matriz de Vandermonde con columnas escaladas. En el Apéndice A se comprueba que su determinante es $|\Phi_0^{(K)}| = T_1^{\frac{K(K+1)}{2}}$.

Finalmente, para

$K = 3$, $t_1 = t_{[-2T_1, -T_1]}$ y $t_n = t_1 + (n-1)T_1$ $n = 2, 3, 4$. Tenemos $|\Phi_0^{(3)}| = T_1^6$.

Su primera columna es:

$$\tilde{\varphi}_0^{(3)}(u) = \begin{cases} \frac{1}{6}(u+3)(u+2)(u+1) & \text{for } -2 \leq u < -1, \\ -\frac{1}{2}(u+2)(u+1)(u-1) & \text{for } -1 \leq u < 0, \\ \frac{1}{2}(u+1)(u-1)(u-2) & \text{for } 0 \leq u < 1, \\ -\frac{1}{6}(u-1)(u-2)(u-3) & \text{for } 1 \leq u < 2, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (15)$$

y las siguientes son : $-F_1 \tilde{\varphi}_0^{(3)}$, $F_1^2 \tilde{\varphi}_0^{(3)}$, y $-F_1^3 \tilde{\varphi}_0^{(3)}$.

En general, el polinomio del c -ésimo intervalo de tiempo de izquierda a derecha del O-spline pasabajas de orden K es dado por

$$p_c(u) = \frac{1}{D_c} \prod_{\substack{n=1 \\ n \neq c}}^{K+1} (u - n - c), \quad c = 1, 2, \dots, K+1 \quad (16)$$

en donde la constante D_c garantiza valor unitario en $u = 0$ en cada polinomio. Se puede reconocer que el conjunto de polinomios en (16) coincide con el conjunto de polinomios de Lagrange de orden K que interpolan una secuencia Dirac Kronecker en ventanas temporales de tamaño K conteniendo su valor unitario central. Cada O-spline es revestido con una pieza de cada uno de esos polinomios, formando el K -ésimo kernel de interpolación central de Lagrange.¹² La forma factorial en (16) permite el cálculo de cualquier O-spline, pieza por pieza, evitando el problema de singularidad encontrado en la inversión numérica de la matriz del operador de Taylor en (8) cuando T_1 es pequeño para cualquier orden $K \in \mathcal{I}$.

En^{12,22 y 23} se demuestra que cualquier pedazo del kernel de interpolación central de Lagrange converge al pedazo correspondiente de la función Sinc cuando $K \rightarrow \infty$

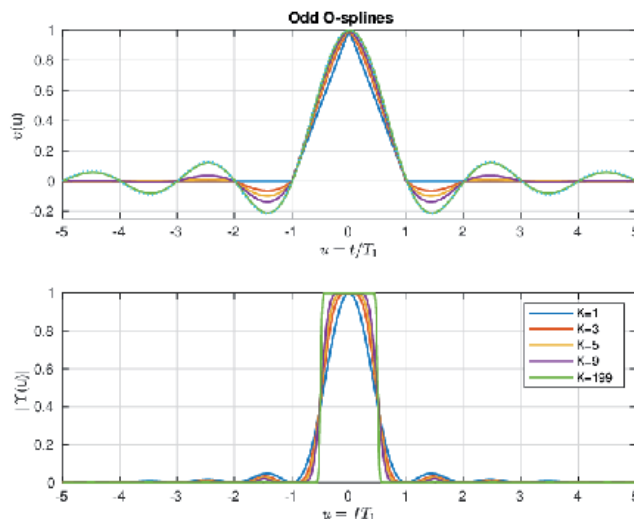


Fig. 1. O-splines pasabajas de orden impar y sus espectros abajo.

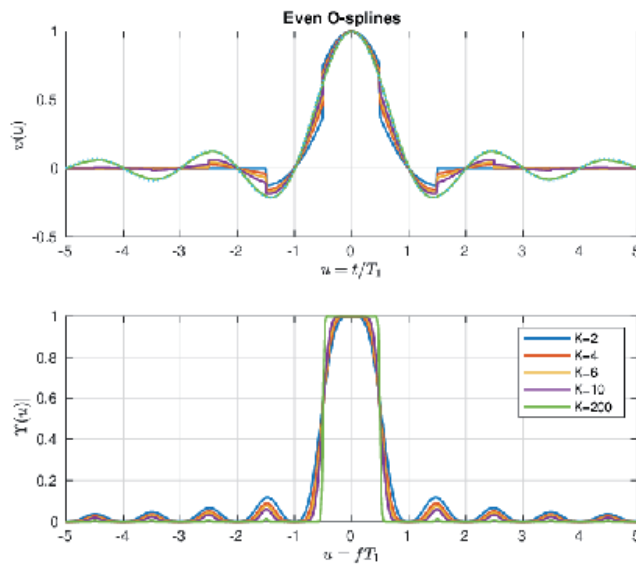


Fig. 2. O-splines pasabajas pares y sus espectros abajo.

RESPUESTA EN FRECUENCIA DE LOS O-SPLINES

El gráfico superior en la figura 1 ilustra algunos O-splines de orden impar, junto con la función Sinc ($K \rightarrow \infty$), y en la inferior sus espectros correspondientes. Como se puede ver, los O-splines forman respuestas impulsionales de filtros FIR que convergen al filtro ideal pasabajas. Cada trozo polinomial se aproxima al lóbulo correspondiente de la función Sinc. Sus respuestas en frecuencia tienen una ganancia pasabanda monótonica y la banda de paro tiene pequeños rizados, y en ese sentido son similares a las de los filtros IIR de Chebyshev tipo II. Los O-splines de orden par también convergen a la función Sinc pero con discontinuidades en los extremos de los trozos polinomiales, las cuáles producen rizados más altos en la banda de paro, como puede verse en los gráficos correspondientes de la figura 2.

La figura 3 muestra los espectros en dB de los O-splines impares de la gráfica al fondo de la figura 1, para evaluar su rendimiento en análisis armónico. Para $K = 200$, la aproximación al filtro ideal es remarcable, ya que el primer lóbulo latera está en -47dB, y las ganancias de paro a -326dB, y para $K = 9$ están en -34 dB y -350dB, respectivamente.

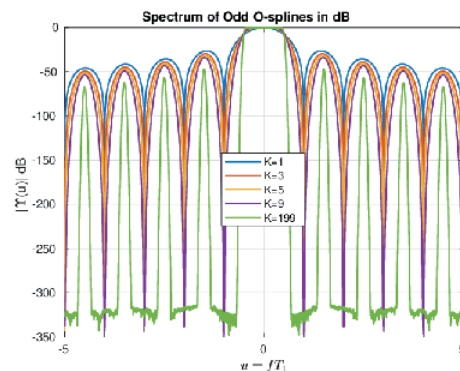


Fig. 3. Espectros en dB de los O-splines pasabajas de orden impar.

Finalmente, en la figura 4 se comparan los MK-splines cuadrático y cúbico con los O-splines de mismo soporte, el cúbico y quintico. Se nota que ambos tipos tienen pasabanda plana, con la más ancha para el O-spline quintico. El primer lóbulo lateral de los MK está a -32 y -42 dB, mientras que los de los O se encuentran a -30 y -31.5 dB, respectivamente. Sin embargo, los MK-splines no tienen bandas de paro máximamente lisas en las armónicas, mientras que los O-splines sí las tienen. Medidas en la primera armónica las ganancias de los MKs son de -60 y -64 dB y de -223 y -322 dB para los O-splines, respectivamente. Esta profesión es crucial en análisis armónico.

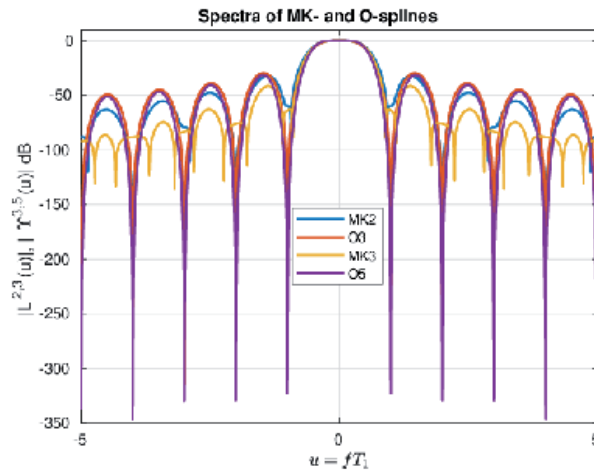


Fig. 4. MK-splines cuadrático y cúbico, comparados con el cúbico y quintico O-spline.

O-SPLINE PASABAJAS Y SUS DERIVADAS

Para un orden dado, la matriz dual contiene no solamente el O-spline pasabajas, sino también sus primeras derivadas. La figura 5 muestra en el primer renglón los primeros cuatro O-splines y sus derivadas en las columnas correspondientes en orden creciente hacia abajo.

Al usar un conjunto vertical como respuestas impulsionales de un banco de filtros, éste ejecuta un muestreo (o remuestreo) de estados de la señal. Note que las derivadas sucesivas de un O-spline son combinaciones lineales de traslaciones sucesivas de los O-splines precedentes, formando una escalera de subespacios de los órdenes anteriores. La última derivada de la diagonal constituye el subespacio del orden más bajo V_0 , generado con traslaciones de $\varphi_0(0)(t)$, los elementos de la primera supradiagonal están en el subespacio de primer orden V_1 , el subespacio de funciones a trozos lineales, generado por traslaciones de $\varphi_0(1)$, y así sucesivamente, hasta el O-spline de más alto grado.

Para el O-spline de tercer orden, se tienen las siguientes derivadas en términos de los O-splines de orden inferior. La primera derivada:

$$\dot{\varphi}_0^{(3)}(u) = F_1[\varphi_0^{(2)}(u + \frac{1}{2}) - \varphi_0^{(2)}(u - \frac{1}{2})], \quad (17)$$

para la segunda:

$$\ddot{\varphi}_0^{(3)}(u) = F_1^2[\varphi_0^{(1)}(u + 1) - 2\varphi_0^{(1)}(u) + \varphi_0^{(1)}(u - 1)], \quad (18)$$

y finalmente su tercera derivada:

$$\ddot{\varphi}_0^{(3)}(u) = F_1^3 [\varphi_0^{(0)}(u + \frac{3}{2}) - 3\varphi_0^{(0)}(u + \frac{1}{2}) + 3\varphi_0^{(0)}(u - \frac{1}{2}) - \varphi_0^{(0)}(u - \frac{3}{2})]. \quad (19)$$

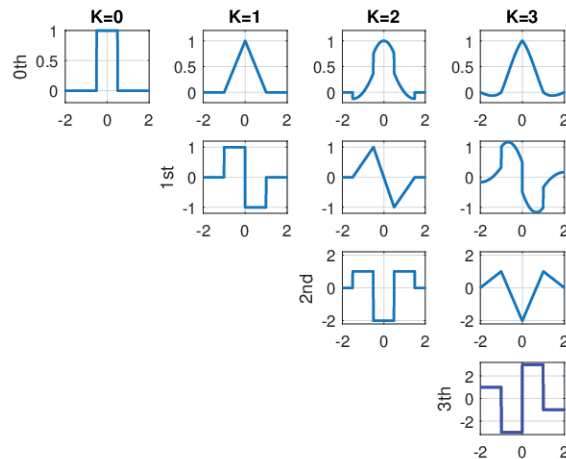


Fig. 5. En el renglón de arriba, los O-splines para $K = 0, 1, 2$, y 3 , y bajo cada uno de ellos sus derivadas sucesivas.

C. Respuesta impulsional y en frecuencia de los Diferenciadores

El gráfico superior de la figura 6 muestra las respuestas impulsionales del primer diferenciador de orden 3 y 5, $\dot{\varphi}_0^{(3)}(u)$, y $\dot{\varphi}_0^{(5)}$. Note que convergen a la primera derivada de la función Sinc mostrada con línea a rayas. mientras sus respuestas en frecuencia, en la gráfica inferior, convergen al del primer diferenciador pasabanda ideal. De hecho, si $H_h(0)(f)$ es la respuesta en frecuencia del O-spline de orden h , entonces la respuesta del primer diferenciador es $H_h(1)(f) = (j2\pi f)H_h(0)(f)$, es decir, una ganancia lineal truncada por la respuesta en frecuencia del O-spline de orden h , como ilustra la línea a rayas.

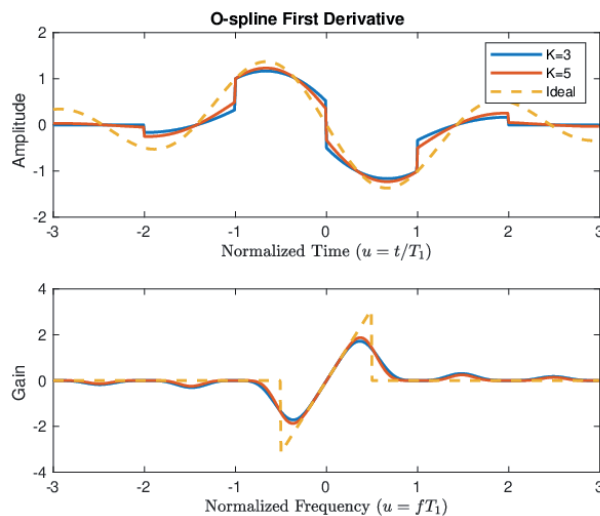


Fig. 6. Respuestas impulsional (arriba) y de frecuencia (abajo) del primer diferenciador con $K = 3$ y $K = 5$. Superpuestas las del ideal con líneas a rayas.

Similarmente, las respuestas impulsionales de los segundos diferenciadores de orden 3 y 5 se muestran en la gráfica superior de la figura 7. Cuando el orden $K \rightarrow \infty$ convergen a la segunda derivada de la función Sinc; mientras sus respuestas en frecuencia, al fondo, tienen una ganancia parabólica en su banda de paso, truncada por la respuesta en frecuencia del O-spline correspondiente, ya que en este caso se tiene $Hh2(f) = (j2\pi f)^2 Hh0(f)$, una ganancia cuadrática ajustada a la ideal mostrada por la línea a rayas.

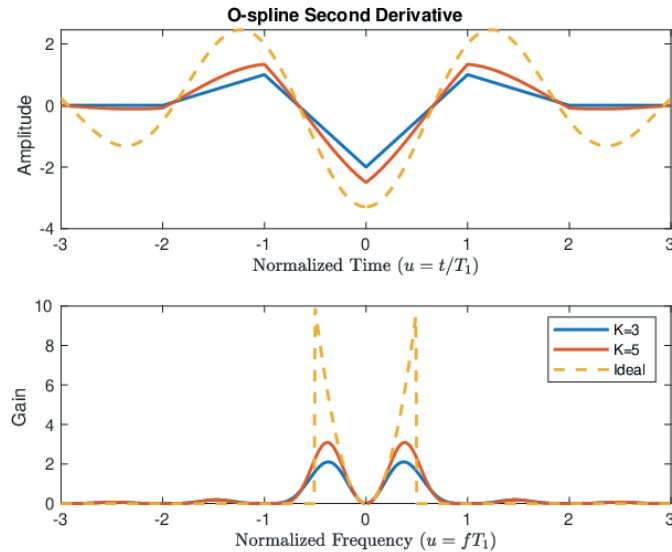


Fig. 7. Respuestas impulsional (arriba) y de frecuencia (abajo) del segundo diferenciador con $K = 3$ y $K = 5$. Superpuestas las del ideal con líneas a rayas.

D. O-splines Armónicos

Los O-splines armónicos son simplemente modulaciones de los O-splines pasabajas a la frecuencia de cada armónica:

$$\tilde{\varphi}_h^{(K)}(u) = \tilde{\varphi}_0^{(K)}(u)e^{j2\pi hu}, \quad h = 0, 1, \dots, N-1. \quad (20)$$

Los cruces por cero de la función compleja exponencial coinciden con los de los O-splines pasabajas, preservando su propiedad cíclica.

RESULTADOS

En esta sección se usarán los O-splines de orden 3 como muestreadores de una señal senoidal de baja frecuencia, en la extracción de un modo de oscilación de frecuencia variable en un sistema eléctrico de potencia real,¹⁰ y para analizar los modos de oscilación de una forma de onda oscilográfica de presión arterial (BPOW, por sus siglas en Inglés) de un paciente de la base de datos presentada en.²⁴ Señales reales con fuertes fluctuaciones de frecuencia son usadas para valorar el rendimiento del método propuesto en escenarios reales. Los O-splines se aplican cada ciclo fundamental, y se aplica interpolación de Taylor o de Hermite para reconstruir las señales.

SEÑALES MUESTREADAS E INTERPOLADAS

La señal sinusoidal continua $s(u) = \cos(u/4)$ y sus primeras dos derivadas se analizan y reconstruyen con el método propuesto. Como su espectro está localizado bajo las ganancias ideales de los diferenciadores, los errores de interpolación son pequeños. Esto ilustra el buen rendimiento de la técnica propuesta. La gráfica superior de la figura 8 muestra la señal y sus primeras dos derivadas mostrando con círculos las muestras estimadas. La desviación estándar de los errores de muestreo es de 4.2×10^{-5} , 1.05×10^{-5} , y 4.59×10^{-4} para la función, primera y segunda derivada, respectivamente. Los errores de interpolación obtenidos con esas muestras con interpolaciones de Taylor de orden 3, 2 y 1 para la función, primera y segunda derivada se ilustran en la figura 9. Los errores máximos de dichas interpolaciones son de 6×10^{-5} , 2.1×10^{-4} , y 5×10^{-4} , respectivamente.

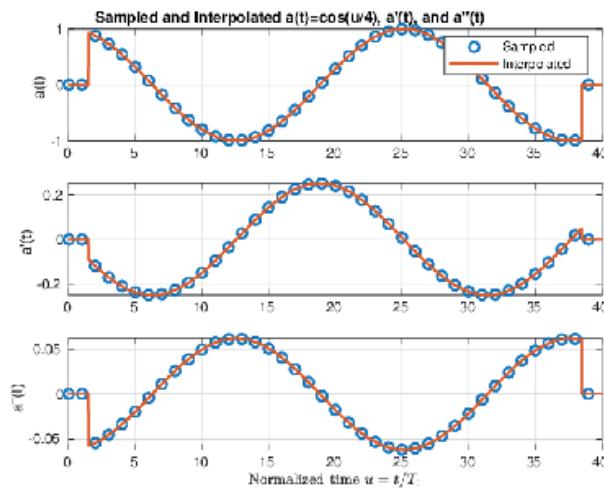


Fig. 8. Función Coseno muestreada e interpolada (arriba) y sus primeras dos derivadas abajo.

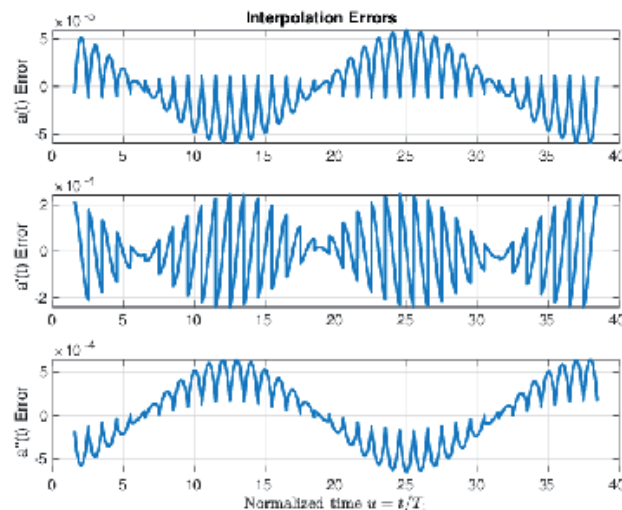


Fig. 9. Error de la señal sintetizada con el modelo de señal de Taylor, y errores de la primera y segunda derivada.

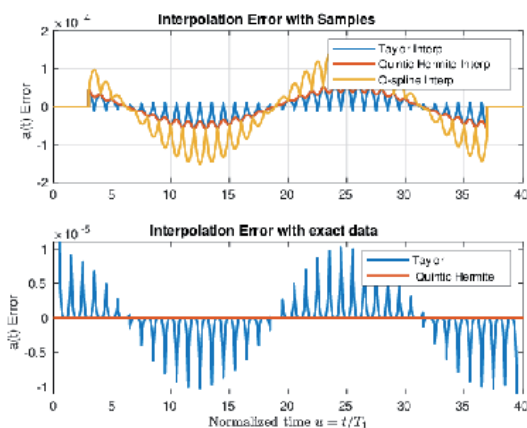


Fig. 10. Errores de interpolación con muestras (arriba), y con datos exactos (abajo).

Las muestras de la señal se interpolan con la interpolación de Taylor, el quinto esquema de Hermite (ver Apéndice B), con el O-spline (usado como interpolador), y con el spline cúbico de Keys.²⁵ Los errores de interpolación se ilustran en el gráfico superior de la Fig. 10 comparados con el error de interpolación de Taylor. El error máximo más pequeño se obtiene con la interpolación de Taylor (con un error máximo de $\pm 6 \times 10^{-5}$), enseguida, el error del interpolador quintico de Hermite envuelve al error de la interpolación de Taylor, y seguido por el error de interpolación con el O-spline, con un error máximo de 1.4×10^{-4} . El peor error de interpolación se obtiene con el spline cúbico de Keys, con un máximo error de 1.2×10^{-2} , el cual se encuentra fuera del rango de los anteriores ilustrados en esa gráfica.

Para evaluar el rendimiento del método óptimo propuesto, en la gráfica inferior de la figura 10 se ilustra los errores obtenidos cuando las muestras exactas de la función y sus derivadas se usan para la interpolación de Taylor de orden 3 y la de Hermite de orden 5. Ambos errores, de Taylor y Hermite son nulos y planos junto a los polos. El error máximo de la interpolación de Taylor es de 10^{-5} , mientras que el de Hermite es de 5×10^{-9} . Comparando esta gráfica con la superior de la figura 9, se puede ver que el método propuesto alcanza un error solamente seis veces mayor que el teórico con interpolación cúbica. La precisión de las muestras estimadas aumenta con O-splines de orden mayor.

B. Oscilación de Potencia

La oscilación de potencia analizada en¹⁰ es tomada como un segundo ejemplo. La oscilación se obtuvo de un sistema de voltajes y corrientes trifásicos, muestreados a 20 muestras por período fundamental en un sistema eléctrico de potencia de 50Hz, y se ilustra en la gráfica superior de la figura 11, con su espectro en la gráfica de en medio. El O-spline de orden 3 con una compresión temporal de dos, y un ancho de banda de 100Hz, cuyo espectro se ilustra en la gráfica del fondo, es usado para extraer la oscilación. En¹⁰ se demuestra que es un modo de oscilación modulado en frecuencia, yendo de cero a 15.6Hz, con un incremento exponencial.

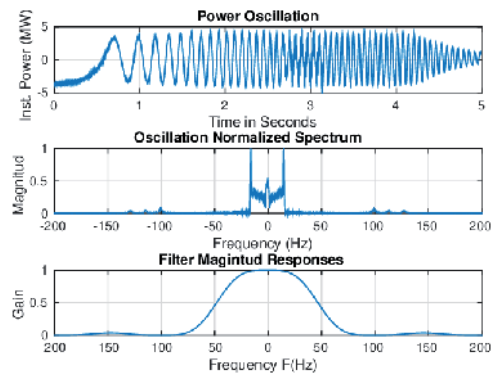


Fig. 11. Oscilación de potencia (arriba), su espectro (en medio), y la respuesta en frecuencia del filtro usado en el análisis (al fondo).

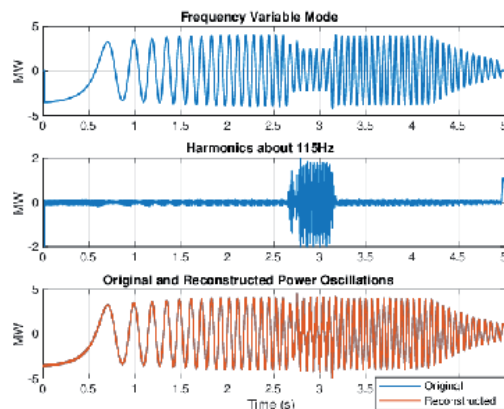


Fig. 12. Modo de frecuencia variable (arriba) y armónicas alrededor de 115Hz (en medio), con la oscilación reconstruida y la original (abajo).

La señal es muestreada cada mitad de ciclo fundamental usando (5) e interpolación de Taylor es usada en esos intervalos con (3). El resultado se muestra en la figura 12. La gráfica superior muestra el modo de oscilación interpolado con polinomios de Taylor. Su frecuencia variable es perceptible porque su período de oscilación va disminuyendo muy rápido hacia el final de la ventana. El ruido en la gráfica de en medio es simplemente la diferencia entre la señal original y la interpolada. La gráfica del fondo muestra la superposición de la señal interpolada y el ruido, superpuesta sobre la original. Se nota que la reconstruida es casi perfecta, a pesar el importante ruido localizado durante la falla. La varianza de la diferencia entre la oscilación interpolada de Taylor y sus estimados instantáneos obtenidos con el muestreador de estados O-spline es igual a 0.0127, el cuál es inferior al 0.32% de la máxima amplitud de la oscilación.

C. Forma de Onda Oscilométricas de Presión Arterial

La estimación de presión sistólica y diastólica de datos numéricos de BPOWs²⁴ es un reto interesante debido a la estructura compleja de estas señales. La extracción del modo fundamental es crucial ya que éste muestra la pulsación principal del corazón. Ambas presiones son estimadas de la envolvente de amplitud de este modo de oscilación.

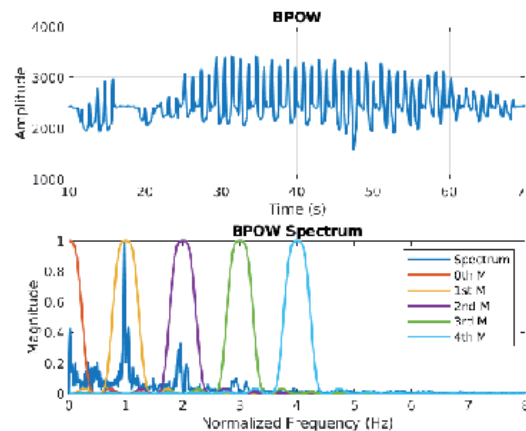


Fig. 13. BPOW (arriba), su espectro y las respuestas en frecuencia de los filtros de análisis (al fondo).

Los demás modos son debidos al comportamiento no linealidad de la manga.

La gráfica superior de la figura 13 muestra la señal BPOW analizada, muestreada a 150 muestras por segundo. Su estructura básica temporal consiste de picos repetitivos con formas de parábolas colgantes que brincan hacia arriba y hacia abajo. Su espectro es ilustrado en la gráfica de abajo junto con las respuestas en frecuencia de los O-splines armónicos usados en la descomposición. Éstos se obtienen modulando el O-spline pasabajos de orden 3 (mbox III-D mbox) dilatado al doble (a 8 ciclos) para reducir su ancho de banda a la mitad. Las muestras se obtienen aplicando producto punto a la señal con traslaciones sucesivas de los O-splines armónicos y sus derivadas, y los modos se reconstruyen con los estimados instantáneos en de (5).

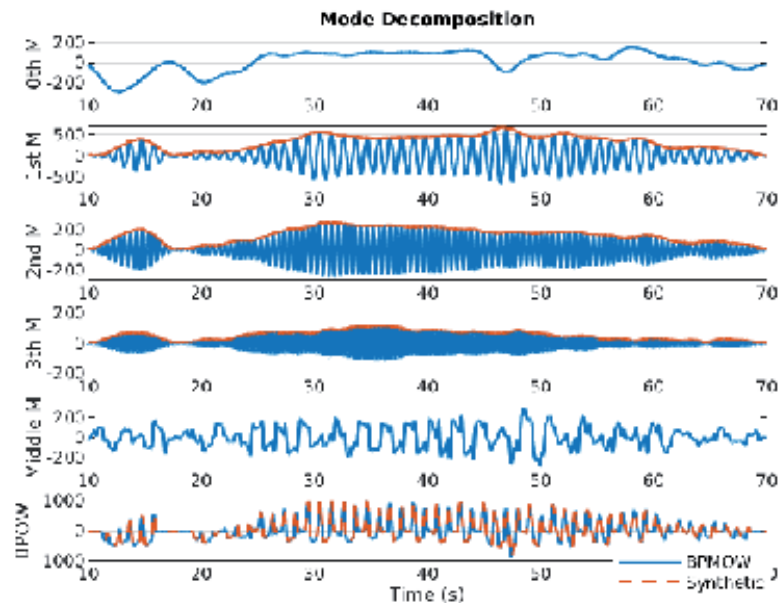


Fig. 14. Descomposición oscilográfica de la BPOW. De arriba hacia abajo los modos predominantes (0,1,2, y 3) seguida por la señal con frecuencias interarmónicas. Al fondo, la señal sintética superpuesta a la original con reconstrucción casi perfecta.

Los modos predominantes de la BPOW se ilustran en las cuatro gráficas superiores de la figura 14, seguida por la señal residual, y finalmente, en la gráfica del fondo, la señal sintética estimada comparada con la señal original. Note que el modo de oscilación de orden cero no es constante, sino que fluctúa a muy baja frecuencia. La envolvente del primer modo (línea roja de la segunda gráfica) tiene la forma parabólica esperada. Por otra parte la señal residual (formada por la energía espectral en las bandas de paro de los filtros) tiene forma de cigüeñal que explica los brinco de las formas parabólicas en la gráfica superior de la figura 13.

La tabla I muestra el error cuadrático medio (MSE) como porciento de la energía de la BPOW cuando los modos consecutivos se van agregando en la señal reconstruida, formando reconstrucción perfecta cuando se incluyen todas las componentes. Las discrepancias se deben a la complejidad de las fluctuaciones de la señal BPOW, cuyos modos no están perfectamente delimitados, como se puede ver en la gráfica del fondo de la figura 13.

Tabla I. Error cuadrático medio normalizado al ir incluyendo modos consecutivos.

Error Cuadrático Medio (%)					
0 87.64	1ero 31.22	2do 19.08	3ero 17.19	4o 17.00	Residual 0.00

DISCUSIÓN

El kernel de interpolación central de Lagrange se usa en la literatura como interpolador,^{22, 14} o como un kernel de aproximación a la función Sinc,¹² pero no como un kernel de análisis, y mucho menos como un muestreador de los estados de una señal. Esta es la contribución de este artículo, junto con la derivación en forma cerrada de las funciones de los O-splines, la cual reduce la complejidad computacional de la DTTFT, especialmente cuando la señal contiene armónicas, como los casos ilustrados en la sección anterior.

En¹² se compara el rendimiento del kernel interpolador central de Lagrange y el spline cardinal fundamental⁶ de órdenes sucesivos. Sin embargo, esta comparación es inválida en nuestra aplicación de análisis, ya que los splines fundamentales tienen soporte infinito, mientras que el soporte de los kernels de Lagrange son finitos.

El método propuesto difiere también del propuesto en,¹³ ya que la función dual de la base interpolatoria no tiene soporte finito. También difiere del usado en,¹⁰ en el cuál únicamente la ecuación de análisis (5) es utilizada con el O-spline y sus derivadas. En el aquí propuesto se usa también la ecuación de síntesis en la interpolación.

CONCLUSIONES

Los O-splines son las respuestas impulsionales de los filtros pasabanda de la DTTFT. Son modulaciones a las frecuencias armónicas del filtro pasabajas. Ellos actúan como el filtro ideal pasabajas con ganancias ideales de diferenciación en las frecuencias armónicas y se usan como muestreadores de los estados de señales

oscilatorias de banda limitada, ofreciendo un algoritmo de compresión de datos óptimo para modos oscilatorios, con un error suficientemente pequeño graduado por el orden del O-spline. Son muy útiles para captar oscilaciones de las cuáles no sólo interesa estimar o interpolar la pura señal, sino también sus derivadas, ofreciendo un potente estimador de estados implementado por filtros FIR, con un gran potencial para aplicaciones de pronóstico y control de sistemas dinámicos.

Apéndice A

Determinante de Matriz Vandermonde

Dada la matriz de Vandermonde:

$$V_K = \begin{pmatrix} 1 & c_1 & c_1^2 & \dots & c_1^{K-1} \\ 1 & c_2 & c_2^2 & \dots & c_2^{K-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & c_K & c_K^2 & \dots & c_K^{K-1} \end{pmatrix} \quad (21)$$

se sabe que:

$$\det(V_K) = \left[\prod_{k=1}^{K-1} (c_K - c_{K-k}) \right] \det(V_{K-1}). \quad (22)$$

En el caso de $\Phi_0^{(K)}$, $t_K - t_{K-k} = kT$, y

$$\det(\Phi_0^{(K)}) = T^K \det(\Phi_0^{(K-1)}) \quad (23)$$

como los factoriales de los términos de Taylor en las columnas de $\Phi_0^{(K)}$ cancelan los factoriales del determinante de la matriz Vandermonde. Por tanto:

$$\det(\Phi_0^{(K)}) = T^K T^{K-1} T^{K-2} \dots T^2 T = T^{\frac{K(K+1)}{2}}. \quad (24)$$

con $\det(\Phi_0^{(0)}) = 1$.

Apéndice B

Interpolador Quíntico de Hermite

La función $f(u)$ entre los instantes t_0 y t_1 , con estados $(y_0, \dot{y}_0, \ddot{y}_0)$ y $(y_1, \dot{y}_1, \ddot{y}_1)$ es la siguiente:

$$f(u) = y_0 \varphi_0(u) + \dot{y}_0 \varphi_1(u) + \ddot{y}_0 \varphi_2(u) \quad (25)$$

$$+ y_1 \varphi_3(u) + \dot{y}_1 \varphi_4(u) + \ddot{y}_1 \varphi_5(u) \quad (26)$$

con los siguientes polinomios quínticos:

$$\varphi_0(u) = 1 - 10u^3 + 15u^4 - 6u^5 \quad (27)$$

$$\varphi_1(u) = u - 6u^3 + 8u^4 - 3u^5 \quad (28)$$

$$\varphi_2(u) = (u^2 - 3u^3 + 3u^4 - u^5)/2 \quad (29)$$

$$\varphi_3(u) = 10u^3 - 15u^4 + 6u^5 \quad (30)$$

$$\varphi_4(u) = -4u^3 + 7u^4 - 3u^5 \quad (31)$$

$$\varphi_5(u) = (u^3 - 2u^4 + u^5)/2. \quad (32)$$

REREFERNCIAS

1. C. de Boor, *A practical Guide to Splines*. Springer, 2001.
2. I. J. Schoenberg, *Cardinal Spline Interpolation*. SIAM, 1973.
3. D. Pang, L. A. Ferrari, and P. Sankar, "B-spline FIR filters," *Circuits Systems and Signal Process*, vol. 13, no. 1, pp. 31–64, 1994, available: <https://doi.org/10.1007/BF01183840>.
4. T. M. Lehmann, C. Gonner, and K. Spitzer, "Survey: interpolation methods in medical image processing," *IEEE Trans. Med. Imag.*, vol. 18, no. 11, pp. 1049–1075, Nov 1999.
5. S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 11, no. 7, pp. 674–693, July 1989.
6. M. Unser, A. Aldroubi, and M. Eden, "B-spline signal processing. Part I– theory," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 41, no. 2, pp. 821–833, Feb 1993.
7. ———, "B-spline signal processing. Part II – efficiency design and applications," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 41, no. 2, pp. 834–848, Feb 1993.
8. M. Unser and T. Blu, "Cardinal exponential splines: part I - theory and filtering algorithms," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 53, no. 4, pp. 1425–1438, April 2005.
9. M. Unser, "Cardinal exponential splines: part II - think analog, act digital," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 53, no. 4, pp. 1439–1449, April 2005.
10. J. A. de la O Serna, "Analyzing power oscillating signals with the O-splines of the Discrete Taylor–Fourier Transform," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 7087–7095, Nov 2018.
11. J. A. de la O Serna, M. R. A. Paternina, A. Zamora-Méndez, R. K. Tripathy, and R. B. Pachori, "EEG-rhythm specific taylor-fourier filter bank implemented with O-splines for the detection of epilepsy using EEG signals," *IEEE Sensors J.*, pp. 1–1, 2020.
12. E. H. W. Meijering, W. J. Niessen, and M. A. Viergever, "The Sinc-approximating kernels of classical polynomial interpolation," in *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'99)*, vol. 3, Oct 1999, pp. 652–656.
13. M. Unser and A. Aldroubi, "A general sampling theory for nonideal acquisition devices," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 42, no. 11, pp. 2915–2925, Nov 1994.
14. E. Meijering, "A chronology of interpolation: from ancient astronomy to modern signal and image processing," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 3, pp. 319–342, March 2002.
15. J. Chen and Z. Cai, "Cardinal MK-spline signal processing: Spatial interpolation and frequency domain filtering," *Information Sciences*, vol. 495, pp. 116 – 135, 2019. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025519303767>
16. J. Chen and Z. Cai, "A new class of explicit interpolatory splines and related measurement estimation," *IEEE Trans. Signal Process.*, pp. 1–1, 2020.

17. G. Rogers, *Power System Oscillations*. Boston: Springer, 2000.
18. A. Roman Messina, *Inter-area Oscillations in Power Systems: A Nonlinear and Nonstationary Perspective*. Springer, 2009.
19. M. Forouzanfar, H. R. Dajani, V. Z. Groza, M. Bolic, S. Rajan, and I. Batkin, "Oscillometric blood pressure estimation: Past, present, and future," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 8, pp. 44–63, 2015.
20. J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed. Boston, MA: McGraw Hill, 2008, sec. 2.1.
21. M. Vetterli, K. Kovacevic, and V. K. Goyal, *Foundations of Signal Processing*, 3rd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014, available at <http://www.fourierandwavelets.org/>.
22. H. W. Meijering, "Image enhancement in digital x-ray angiography." [Online]. Available: <https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/367/c6.pdf>
23. A. K. Jain, *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1989.
24. J. A. De la O Serna, "Taylor-Fourier analysis of blood pressure oscillometric waveforms," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 9, pp. 2511–2518, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2013.2258245>
25. R. Keys, "Cubic convolution interpolation for digital image processing," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 29, no. 6, pp. 1153–1160, December 1981.

Comportamiento de orden fraccionario en la respuesta de un circuito RC mediante derivada de núcleo singular

Ernesto Zambrano-Serrano, Miguel A. Platas-Garza,
Alejandro E. Loya-Cabrera, Guadalupe E. Cedillo-Garza,
Cornelio Posadas-Castillo

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y
Eléctrica, Departamento de Electrónica y Automatización.
cornelio.posadascs@uanl.edu.mx

RESUMEN

En este artículo, se presenta la ecuación diferencial fraccionaria de un circuito electrónico RC en términos de la derivada fraccionaria de tipo Caputo y la solución analítica exacta usando propiedades de la transformada de Laplace y la función Mittag-Leffler. El orden de la derivada fraccionaria es definido en el intervalo $0 < q \leq 1$, preservando la dimensionalidad de los parámetros R y C . Además, se muestra la respuesta experimental del circuito propuesto y se compara con las soluciones analíticas. Los resultados muestran que el voltaje del capacitor depende directamente de los valores del orden fraccionario.

PALABRAS CLAVE

Circuito electrónico RC, cálculo fraccionario; solución analítica, derivada tipo Caputo.

ABSTRACT

This paper proposes the fractional-order differential equation of an RC electronic circuit in terms of the Caputo-type fractional derivative. The fractional-order derivative is defined in the interval $0 < q \leq 1$ considering the dimensionality of the parameters R and C . The exact analytical solution is presented using properties of the Laplace transform and Mittag-Leffler function. Besides, the experimental response of the proposed circuit is presented and compared with the analytical solutions. The results show that the voltage depends on the values of the fractional order.

KEYWORDS

RC electronic circuit, fractional calculus, analytical solution; Caputo derivative

INTRODUCCIÓN

El cálculo de orden fraccionario se ocupa del estudio de las derivadas e integrales de orden arbitrario sobre dominios reales o complejos y sus aplicaciones. Tiene sus raíces en 1695, en una carta de L'Hopital a Leibniz, donde el primero preguntó sobre el posible significado de una derivada d^n/dt^n cuando $n=1/2$.

En respuesta a la carta recibida, Leibniz contestó: “Es una aparente paradoja, de la cual algún día se extraerán consecuencias muy útiles”. Esta respuesta atrajo la atención de brillantes científicos durante los siglos XVIII y XIX.¹ De entre los cuales podemos mencionar a Euler (1738), Laplace (1812), Fourier (1822), Abel (1823), Liouville (1832-1855), Grünwald (1867), Letnikov (1868-1872), Riemann (1876), Laurent (1884) o Heaviside (1893-1912).

Recientemente, el cálculo de orden fraccionario ha experimentado avances considerables en diferentes áreas del conocimiento como física, biología, química, matemáticas e ingeniería, considerando la aplicación del cálculo fraccionario en problemas del mundo real como se muestran Su *et al.*² y Tavazoei.³ Hoy en día, muchos matemáticos e ingenieros están interesados en este nuevo campo. Intentando dar respuesta a las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo caracterizar la derivada fraccionaria utilizada en este nuevo campo? ¿Cuál es la importancia de una derivada fraccionaria? ¿Cuándo y dónde podemos usar la derivada fraccionaria?

Las derivadas fraccionarias son operadores no locales debido a que se definen por medio de integrales. Por tanto, la derivada fraccionaria contiene información sobre la función en todos sus puntos anteriores, por lo que posee un efecto de memoria; esto significa que el siguiente estado de un sistema depende no sólo de su estado actual, sino también de todos los estados históricos. Esto es más realista y los resultados derivados de los sistemas fraccionarios son de naturaleza más general y son esenciales para una descripción y comprensión más precisa del comportamiento del sistema complejo y dinámico.⁴ Asimismo, las derivadas e integrales de orden fraccionario consideran propiedades hereditarias, fenómenos de relajación, fractalidad temporal a diferentes escalas, heterogeneidades materiales y efectos distribuidos no locales, los cuales son fundamentales para describir los componentes eléctricos.² Otra característica del cálculo fraccionario es la inclusión de nuevos grados de libertad al sistema al incrementar la información que se puede obtener de la naturaleza del fenómeno en cuestión.

Actualmente, existen muchos tipos de derivadas fraccionarias en el cálculo fraccionario. Las definiciones más utilizadas son las propuestas por Riemann-Liouville y Caputo, las cuales son definidas por medio de la convolución de la derivada local de una función dada con una función de ley de potencias,⁴ también conocida como derivada fraccionaria de núcleo singular. Mientras que Caputo y Fabrizio, hicieron una interesante propuesta de derivada de orden fraccionario, proponiendo un operador con núcleo local y no singular que involucra la ley de decaimiento exponencial en lugar de la ley de potencias.⁵ Con base en la función de Mittag-Leffler extendida generalizada no singular y no local, Atangana y Baleanu propusieron dos derivadas fraccionarias en el sentido de Liouville-Caputo y Riemann-Liouville. Las derivadas de orden fraccionario propuestas por Atangana y Baleanu son al mismo tiempo filtros y operadores fraccionarios.⁶ Khalil *et al.* propusieron extender las definiciones de límites ordinarios de las derivadas en una función llamada derivada conformable.⁷

Recientemente, muchos investigadores han intentado modelar procesos reales utilizando el cálculo fraccionario. Munoz-Pacheco, *et al.*⁸ quienes estudiaron el efecto que agrega la memoria en un sistema regulador de glucosa-insulina mediante la aplicación de un operador fraccionario. Rosales *et al.*⁹ investigaron

la solución de un circuito RC usando diferentes tipos de operadores fraccionarios. La solución analítica del circuito RLC considerando los operadores Fabrizio-Caputo, Atangana-Baleanu-Caputo, Atangana-Koca-Caputo es presentada por Gómez-Aguilar.¹⁰ Ndolane Sene analiza la estabilidad asintótica local y la estabilidad asintótica global de un circuito RLC considerando el operador de Liouville-Caputo.¹¹ También muestra la estabilidad de entrada fraccionaria, estudiando la estabilidad asintótica global uniforme de las ecuaciones diferenciales fraccionarias de los circuitos RL, RC y LC.¹² De acuerdo con las referencias previamente mostradas, únicamente se han reportado soluciones analíticas y análisis de estabilidad de circuitos electrónicos en configuraciones RC, RLC, LC y RL considerando operadores de orden fraccionario sin mostrar a manera de comparación la respuesta experimental de un circuito RC. El único reporte en la literatura relacionado a la implementación de un circuito RC considerado operadores fraccionarios es el de Gómez-Aguilar *et al.*¹³ donde presenta el resultado obtenido en un espectroscopio aplicado a un RC.

Teniendo en cuenta tal falta, este artículo hace una contribución al tema presentando la comparación entre la implementación experimental del circuito RC y la solución analítica de orden fraccionario basado en la derivada fraccionaria de tipo Caputo.

El resto de artículo está organizado de la siguiente manera, primero se presentan algunos conceptos preliminares relacionados al cálculo fraccionario. Luego se muestra la solución analítica de un circuito RC en serie de orden fraccionario. La implementación experimental del circuito RC y la comparación con la respuesta de orden fraccionario se reportan después, finalmente, se presentan una serie de comentarios a modo de conclusión.

DEFINICIONES DE ORDEN FRACCIONARIO

En esta sección recordamos las principales definiciones de los operadores de orden fraccionario. La definición de la derivada fraccionaria de tipo Caputo esta expresada de la siguiente forma:

Definición 1.⁴ Considere una función $f: [0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}$, la derivada fraccionaria en el sentido de Caputo de la función f de orden q es formulada mediante la expresión.

Para todo $t > 0$, donde q es el orden de la derivada fraccionaria y $\Gamma(\cdot)$ es la función Gamma.

$${}_0^C D_t^q f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-q)} \int_0^t \frac{f'(s)}{(t-s)^q} ds ; \quad n-1 < q \leq n, \quad (1)$$

La definición de la derivada de orden fraccionario en el sentido de Caputo es ampliamente considerada en el estudio de sistemas en el dominio del tiempo, debido a que, las condiciones iniciales para la derivada fraccionaria de tipo Caputo pueden ser expresadas de la misma forma que una ecuación diferencial ordinaria y con una interpretación física conocida. Además, de que la derivada de una constante en el sentido de Caputo es cero.

La transformada de Laplace de la ecuación (1) se define de la siguiente forma

$$\mathcal{L}[{}^C D_t^q f(t)] = s^q F(s) - \sum_{k=0}^{n-1} s^{q-k-1} f^{(k)}(0) \quad ; \quad n-1 < q \leq n, \quad (2)$$

donde $f^{(k)}$ es la k -ésima derivada ordinaria. La transformada inversa de Laplace requiere la introducción de la función Mittag-Leffler, la cual es definida como:

Definición 2.⁴ La función Mittag-Leffler con dos parámetros es expresada de la siguiente forma

$$E_{q,\beta}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(qk + \beta)} \quad , \quad (3)$$

donde $q > 0, \beta \in \mathbb{R}$, y $z \in \mathbb{C}$.

En particular cuando $q=1$ y $\beta=1$ de la ecuación (3) se tiene que

$$E_{1,1}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(k+1)} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{k!} = e^z \quad . \quad (4)$$

Por lo que se considera a la función exponencial como un caso particular de la función Mittag-Leffler.

SOLUCIÓN DEL CIRCUITO RC CON OPERADORES LOCALES Y NO LOCALES

En este artículo se considera el circuito eléctrico RC descrito por la figura 1.

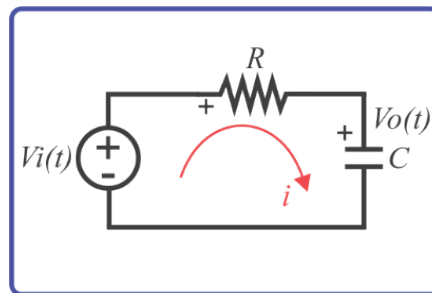


Fig.1. Circuito RC.

Considerando las leyes de voltaje de Kirchhoff, la ecuación diferencial que describe el comportamiento del circuito RC esta expresada como

$$\frac{dVo(t)}{dt} + \frac{Vo(t)}{RC} = \frac{Vi(t)}{RC} \quad , \quad (5)$$

donde $RC=\tau$ es la constante de tiempo del circuito, R es la resistencia expresada en Ohms, C es la capacitancia medida en Faradios, $Vo(t)$ es el voltaje en el capacitor, y $Vi(t)$ es el voltaje de entrada. Considerando que el voltaje inicial sobre el capacitor es $Vo(0)=0$, y asumiendo que la fuente $Vi(t)$ corresponde a una entrada constante Vi la solución de la ecuación (5) en el dominio de tiempo es

$$Vo(t) = Vi \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (6)$$

la ecuación (6) describe la carga del circuito RC considerando una fuente constante. Por otra parte, preservar la dimensionalidad física al momento de considerar un operador de orden fraccionario es crucial en la aplicación. En matemáticas puras por lo general, la derivada de orden entero es remplazada por definiciones de orden fraccionario, pero, esto no es suficiente para problemas físicos y algunas aplicaciones en ingeniería. Por tanto, se requiere de una modificación dimensional para el caso fraccionario. Para este propósito, Rosales *et al.*⁹ y Gomez-Aguilar¹⁰ proponen una metodología sistemática capaz de diseñar ecuaciones diferenciales fraccionarias para sistemas físicos, la cual consiste en transformar la derivada ordinaria en una derivada fraccionaria de la siguiente forma

$$\frac{d}{dt} \rightarrow \frac{1}{\sigma^{1-q}} \frac{d^q}{dt^q}; \quad 0 < q \leq 1. \quad (7)$$

La introducción del parámetro σ permite la consistencia dimensional cuando $\sigma = \text{seg}$. Además, cuando $q=1$ la ecuación (7) es una ecuación diferencial ordinaria de primer orden con respecto al tiempo t .

Sustituyendo (7) en (5) obtenemos la ecuación diferencial de orden fraccionario correspondiente al circuito RC expresada de la siguiente forma

$$\frac{d^q Vo(t)}{dt^q} + \frac{Vo(t)}{\tau^q} = \frac{Vi(t)}{\tau^q}; \quad 0 < q \leq 1, \quad (8)$$

donde $\sigma = \tau = RC$ es la constante de tiempo expresada en segundos y el operador $d^q/dt^q = {}^C D_t^q$ expresando en (1). Entonces la solución analítica de la ecuación diferencial fraccionaria definida por (8) se obtiene aplicando la transformada de Laplace expresada en (2) en ambos lados de la ecuación (8) y, asumiendo que la fuente $Vi(t)$ corresponde a una entrada constante Vi obtenido la siguiente relación

$$\begin{aligned} s^q \mathcal{L}(Vo(t)) + \frac{1}{\tau^q} \mathcal{L}(Vo(t)) &= \frac{1}{\tau^q} \mathcal{L}(Vi), \\ Vo(s) \left(s^q + \frac{1}{\tau^q} \right) &= \frac{Vi}{s \tau^q}, \\ Vo(s) &= \frac{Vi}{s(s^q \tau^q + 1)}, \end{aligned} \quad (9)$$

donde $Vo(s)$ es la transformada de Laplace de $Vo(t)$. Considerando el método propuesto por Kenneth y Ross¹⁴ y aplicando la transformada inversa de Laplace es posible expresar (9) como una serie

$$Vo(t) = Vi \left[1 - \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{t}{\tau} \right)^{kq}}{\Gamma(kq + 1)} \right], \quad (10)$$

entonces la solución analítica de la ecuación diferencial fraccionaria (10) es expresada como:

$$V_o(t) = V_i \left[1 - E_q \left(- \left(\frac{t}{\tau} \right)^q \right) \right], \quad (11)$$

donde $E_q(.)$ representa la función Mittag-Leffler (3) con $\beta=1$.

La figura 2, muestra el comportamiento en el tiempo del voltaje en el capacitor $V_o(t)$ expresado en (11) considerando diferentes valores de orden fraccionario q , con incrementos $\Delta q=0.1$, una fuente de voltaje de entrada constante $V_i=10$ Volts, un Capacitor $C=1 \mu\text{F}$, una Resistencia $R=1 \text{ M}\Omega$ y $\tau=1$ seg, donde se observa que conforme $q \rightarrow 0$ el voltaje de salida decrece similarmente.

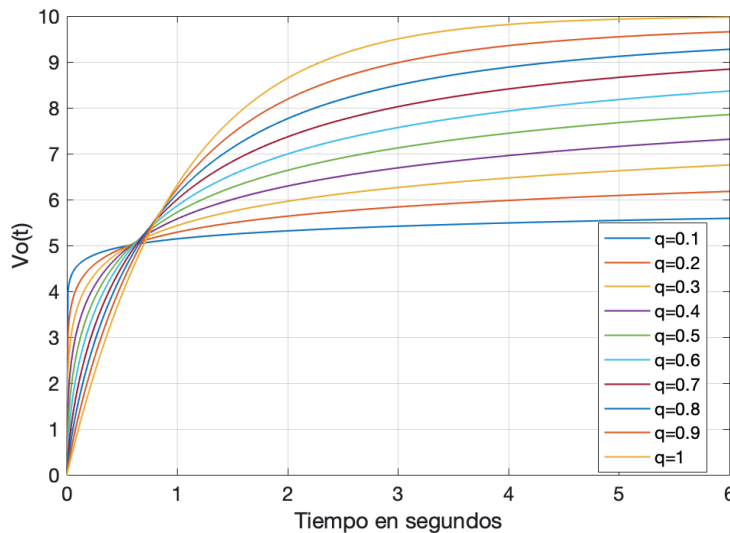


Fig. 2. Solución analítica de la ecuación (11) considerando diferentes valores de q correspondiente al voltaje en el capacitor $V_o(t)$.

DISEÑO EXPERIMENTAL DEL CIRCUITO RC

Para propósitos experimentales, consideramos la plataforma NI-myRIO-1900. NI-myRIO es un dispositivo embebido el cual cuenta con entradas analógicas, salidas analógicas, además de líneas de E/S digitales, LEDs, acelerómetro un FPGA Xilinx y un procesador ARM Cortex-A9. La relativa simplicidad que ofrece el dispositivo al momento de configurarlo ha permitido su consideración en diferentes áreas tales como procesamiento de señales, sistemas control, robótica y mecatrónica.

El circuito RC mostrado en la figura 1 fue implementado de forma práctica como se muestra en la figura 3. Las principales características del dispositivo myRIO son:

Procesador Xilinx Z-7010.

Velocidad 667 Mhz.

Memoria DDR3 de 256Mb.

Salidas analógicas de ± 10 Volts.

Resolución de 12 bits.

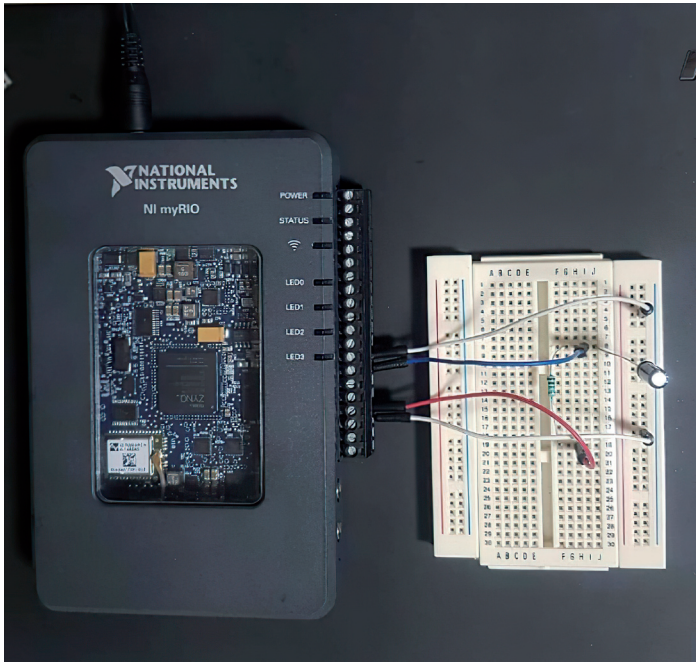


Fig. 3. Implementación electrónica del circuito RC.

El valor de los elementos pasivos es

Resistencia $R=1\text{ M}\Omega$.

Capacitor $C=1\text{ }\mu\text{F}$.

El proceso de adquisición de datos fue implementado en LabView con el objetivo de obtener los datos experimentales de la respuesta en el tiempo del circuito RC. El diseño del instrumento virtual realizado en LabView se muestra en la figura 4. La figura 4 (arriba), muestra el diseño del instrumento virtual. De la figura 4 (abajo) el bloque “analog input” es utilizado para adquirir una muestra de voltaje en el capacitor el cual se encuentra conectado al puerto de entrada analógica, mientras que el bloque “analog output” envía la señal de excitación al circuito RC mediante una salida analógica. El proceso en lazo cerrado está configurado para realizarse cada 5 milisegundos.

Además, los datos obtenidos experimentalmente son procesados en Matlab 2016b. La medición adquirida experimentalmente es comparada con la solución analítica (11) considerando la suma de los errores cuadráticos para diferentes valores de orden fraccionario q ; la suma de los errores cuadráticos son considerados como criterio de ajuste o función de costo, la cual se realiza considerando la siguiente ecuación

$$J = \sum_{k=1}^N (V_o[k] - y_m[k])^2, \quad (12)$$

donde $V_o[k]$ representa la k -ésima muestra de la solución analítica, $y_m[k]$ es la señal adquirida experimentalmente y N es número de datos obtenidos experimentalmente.

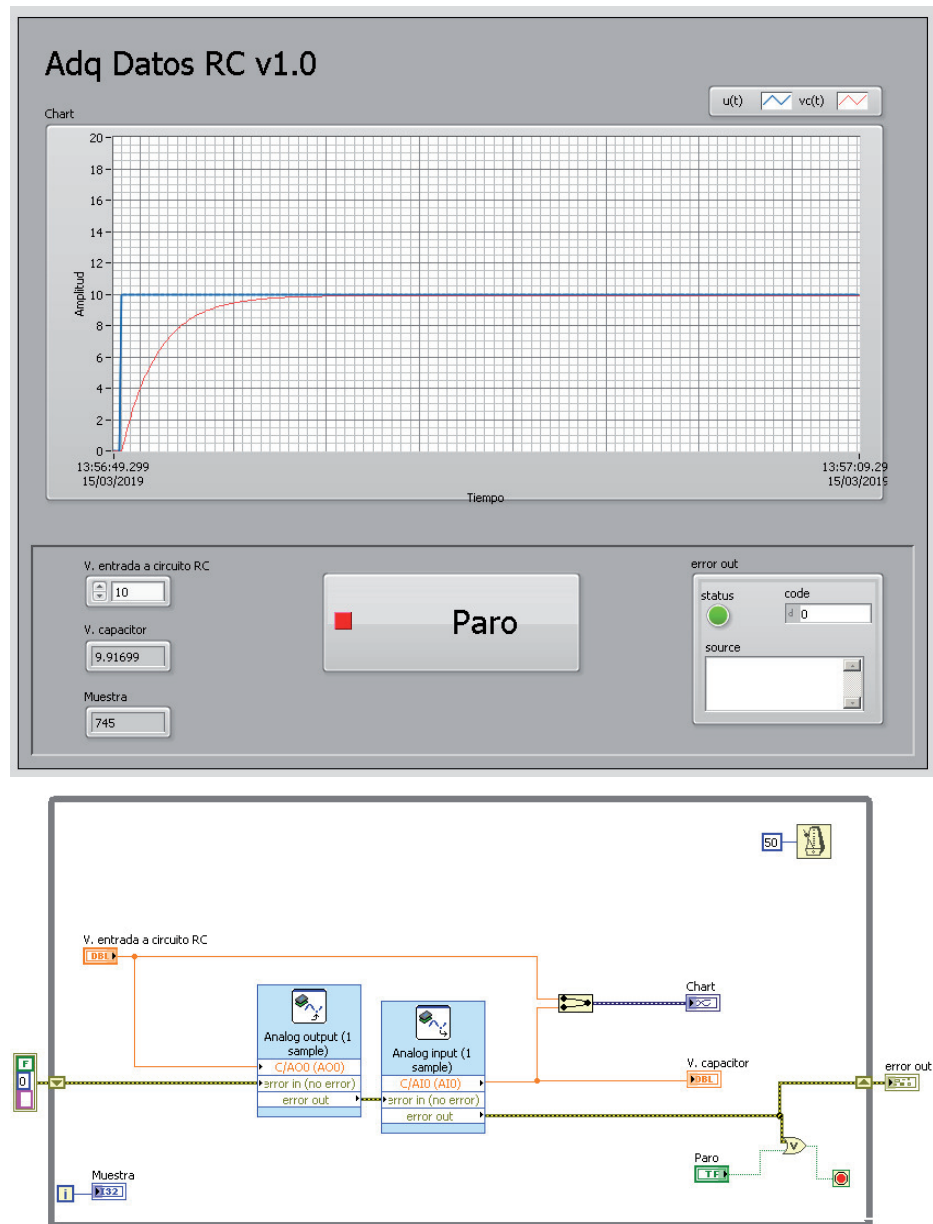


Fig. 4. Diseño del instrumento virtual en LabView. (arriba) vista frontal del instrumento, (abajo) diseño del instrumento.

La figura 5 muestra el valor de la función de costo (12) para diferentes valores de q , en este artículo tomamos en cuenta 80 diferentes valores de orden q considerando el siguiente intervalo $q \in (0.95, 0.99)$. Bajo estas condiciones, se obtiene que el valor mínimo de q que mejor se aproxima a la solución experimental del circuito RC mostrado en la figura 1 con una resistencia $R = 1\text{ M}\Omega$, un capacitor $C = 1\text{ }\mu\text{F}$ y una entrada constante de $V_i = 10$ volts. Bajo estas condiciones, se obtiene que el valor mínimo de $q = 0.98475$.

En la figura 6 (Respuesta del circuito RC) se observa la respuesta experimental adquirida en color rojo, la solución analítica (11) considerando un orden fraccionario $q = 0.98475$ en color azul y la solución analítica de orden

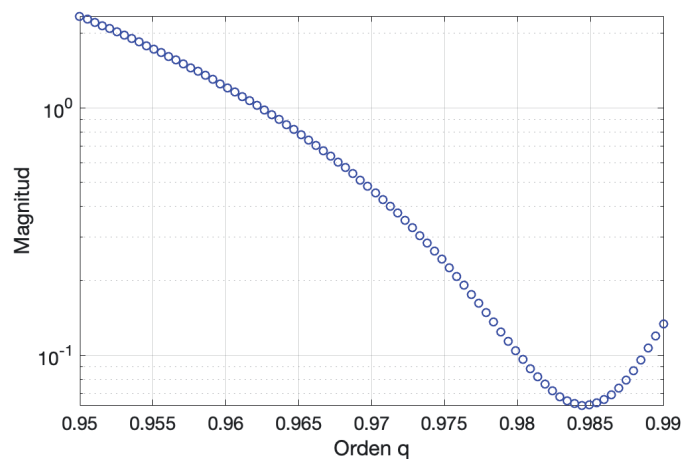


Fig. 5. Evaluación de función de costo para determinar la mejor aproximación.

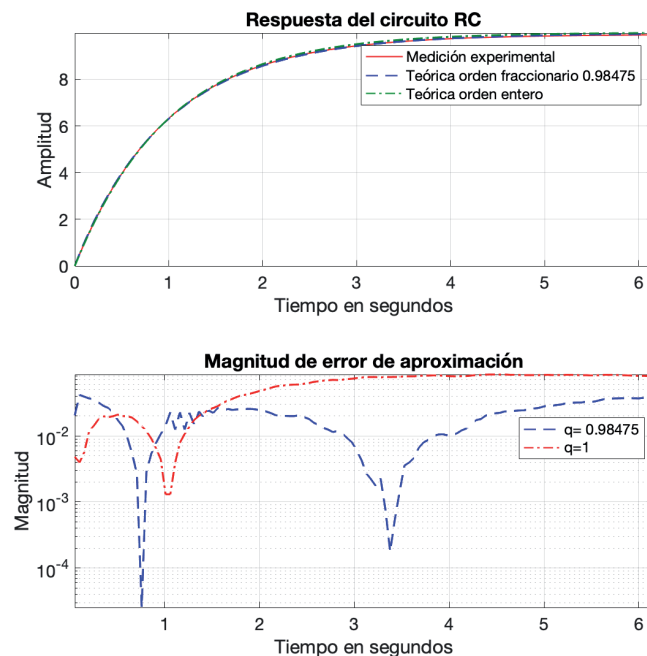


Fig. 6. Error de aproximación para la respuesta de orden fraccionario propuesta y la respuesta de orden entero.

entero mostrada en (6) en color verde. Mientras que en la figura 6 (Magnitud de error de aproximación) se muestra la magnitud de los errores de ambas aproximaciones. Note que la aproximación fraccionaria tiene un error menor que la de orden entero.

COMENTARIOS FINALES

En este artículo se estudió la solución analítica y la respuesta experimental de un circuito RC considerando la definición de la derivada fraccionaria de

tipo Caputo, además, se consideró la metodología de diseño de ecuaciones diferenciales fraccionarias de sistemas físicos preservando la dimensionalidad de los elementos pasivos R y C. Se presentó la solución analítica considerando la transformada de Laplace y la función Mittag-Leffler para un intervalo $0 < q \leq 1$. El circuito RC analizado fue implementado electrónicamente considerando la plataforma NI-myRIO-1900. Donde los resultados experimentales fueron procesados en Matlab y comparados con la solución analítica considerando diferentes valores de orden fraccionario q . Por medio de una función de costo se determinó el valor mínimo de orden q que mejor se aproxima a los datos experimentales obtenidos por la tarjeta NI-myRIO-1900, obteniendo que la mejor aproximación ocurre cuando se considera el siguiente valor $q=0.98475$. Finalmente, se observa que conforme $q \rightarrow 0$ el voltaje de salida $V_o(t)$ decrece similarmente.

AGRADECIMIENTOS

E. Zambrano-Serrano agradece a CONACYT/MÉXICO (350385), y al Cuerpo Académico Automatización y Control de la UANL. C. Posadas-Castillo agradece a CONACYT/MÉXICO No. 166654, A1-S-31628. Todos los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL.

REFERENCIAS

1. D. Baleanu, K. Diethelm, E. Scalas and J. Trujillo, *Fractional Calculus: Models and Numerical Methods*, London: World Scientific Publishing, 2017.
2. H. Su, Y. Zhang, D. Baleanu, W. Chen and Y. Chen, "A new collection of real world applications of fractional calculus in science and engineering," *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 64, pp. 213-231, 2018.
3. M. Tavazoei, "Fractional order chaotic systems: history, achievements, applications, and future challenges," *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 229, pp. 887-904, 2020.
4. I. Podlubny, *Fractional Differential Equations*, New York: Academic Press, 1998.
5. M. Caputo and M. Fabrizio, "A new Definition of Fractional Derivative without singular kernel," *Progress in Fractional Differentiation and Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 73-85, 2015.
6. A. Atangana and D. Baleanu, "New fractional derivatives with non-local and non-singular kernel," *Thermal Science*, vol. 20, no. 2, pp. 763-769, 2016.
7. R. Khalil, M. Al Horani, A. Yousef and M. Sababheh, "A new definition of fractional derivative," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 264, pp. 65-70, 2014.
8. J. Munoz-Pacheco, C. Posadas-Castillo and E. Zambrano-Serrano, "The Effect of a Non-Local Fractional Operator in an Asymmetrical Glucose-Insulin Regulatory System: Analysis, Synchronization and Electronic Implementation," *Symmetry*, vol. 12, no. 9, p. 1395, 2020.
9. J. Rosales, J. Filoteo and G. A., "A comparative analysis of the RC circuit

- with local and non-local fractional derivatives,” *Revista Mexicana de Fisica*, vol. 64, no. 6, pp. 647-654, 2018.
- 10.J. Gómez-Aguilar, “Fundamental solutions to electrical circuits of non-integer order via fractional derivatives with and without singular kernels,” *The European Physical Journal Plus* volume, vol. 133, p. 197, 2018.
- 11.N. Sene, “Stability analysis of electrical RLC circuit described by the Caputo-Liouville generalized fractional derivative,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, pp. 2083-2090, 2020.
- 12.N. Sene, “Fractional input stability for electrical circuits described by the Riemann-Liouville and the Caputo fractional derivative,” *AIMS Mathematics*, vol. 4, no. 1, pp. 147-165, 2019.
- 13.J. Gómez-Aguilar, J. Rosales-Garcia, J. Razo-Hernandez and G.-C. M, “Fractional RC and LC electrical circuits,” *Ingenierias Investigación y Tecnología* , vol. 15, no. 2, pp. 311-319, 2014.
- 14.M. Kenneth and B. Ross, *An Introduction to the fractional Calculus and Fractional Differential Equations*, Wiley-Blackwell, 1993.

Explorando el océano a través de paisajes sonoros

Jennifer L. Miksis-Olds^A, Bruce Martin^B, Peter L. Tyack^C

^A School of Marine Science and Ocean Engineering University of New Hampshire, Estados Unidos de América

^B JASCO Applied Sciences, Canadá

^C Sea Mammal Research Unit Scottish Oceans Institute School of Biology University of St Andrews Fife St Andrews, Escocia, Reino Unido
j.miksisolds@unh.edu; bruce.martin@jasco.com; plt@st-andrews.ac.uk

RESUMEN

Escuchar paisajes sonoros submarinos nos ayuda a entender cómo la física oceánica y la biología de las comunidades marinas están respondiendo a un océano que cambia dinámicamente.

PALABRAS CLAVE

Paisajes sonoros, señales acústicas en los océanos.

ABSTRACT

Listening to underwater soundscapes helps us understand how ocean physics and the biology of marine communities are responding to a dynamically changing ocean.

KEYWORDS

Ocean soundscapes, acoustic signals in the oceans.

INTRODUCCIÓN

Es una tarde clara y usted está mirando hacia el horizonte desde el punto más alto dentro de 100 km. Se pueden ver “millas y millas”, pero los únicos sonidos que se pueden escuchar son la gente con usted, algunos pájaros, insectos y el viento. Ahora, si usted fuera a un punto equivalente en el océano para estar parado en la cresta del medio Atlántico con vista a la llanura abisal del océano, usted todavía tendría 1,200 m de agua oscura alrededor. Escuchando a través de un hidrófono, los sonidos serían extraordinariamente ricos. Se oirían los crustáceos arañando la roca y los corales de aguas profundas. Las ballenas de esperma, las ballenas con pico y las ballenas piloto estarían buscando comida mediante ecolocalización. Los llamados de la ballena azul y de aleta, atrapados en el canal de sonido profundo, llegarían de miles de kilómetros de distancia. Cada pocos segundos, el canal de sonido también traería pulsos de energía de los estudios sísmicos de petróleo y gas que llegan desde Brasil, África, el Mar del Norte y Terranova.

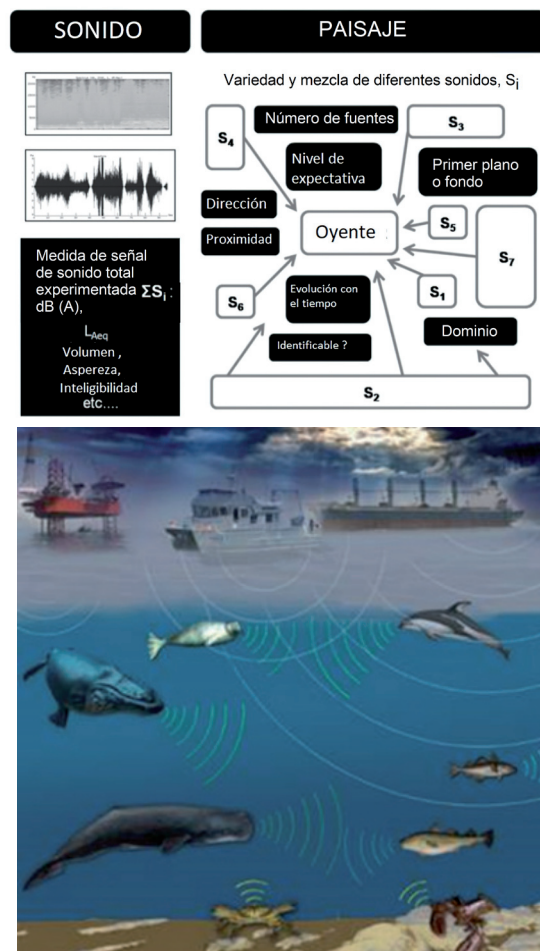
La investigación acústica subacuática ha revelado la increíble física de cómo se propaga el sonido en el océano, motivado principalmente por el uso del sonido para detectar petróleo y gas bajo la corteza terrestre o para aplicaciones navales. A lo largo del camino, aprendimos que la vida marina ha aprovechado la física

oceánica y ha evolucionado en el uso del sonido como una modalidad sensorial primaria para interactuar con el medio ambiente. Ahora estamos escuchando las conversaciones submarinas y utilizando la acústica pasiva para evaluar la biodiversidad marina, la densidad animal y el estado y la salud del ecosistema. Este artículo presenta la idea de un paisaje sonoro submarino, el uso exitoso del paisaje sonoro para entender la ecología marina, el modelado de paisajes sonoros y el sonido oceánico como una variable oceánica esencial (EOV).

PAISAJES SONOROS SUBACUÁTICOS

Una gran cantidad de información relacionada con la dinámica de los océanos y las actividades humanas puede obtenerse simplemente escuchando el campo de sonido ambiental. Este paisaje acústico, o paisaje sonoro, es la suma de múltiples fuentes sonoras que llegan a la ubicación de un animal receptor o un grabador acústico. Los sonidos medidos en una grabadora acústica se caracterizan por nuestras mediciones típicas de ingeniería tales como niveles de presión acústica, niveles de exposición ponderados del sonido (SELs), rugosidad, y curtosis. La percepción de los sonidos a la vida marina depende de la contribución relativa de cada fuente, dirección de la fuente, propagación a través del entorno, texto conductual, capacidad auditiva del oyente, e historia del oyente con sonidos similares (figura 1).

Fig. 1. Arriba: el paisaje sonoro está compuesto por el sonido, las mediciones físicas del campo sonoro, y el paisaje que transmite cómo todas las fuentes sonoras se superponen y son percibidas por el oyente. Cajas blancas: señales $S_{i(1-7)}$ procedentes de fuentes sonoras en el entorno con diferentes tamaños y orientaciones destinadas a transmitir diferentes tipos de fuentes; cajas negras: características físicas y perceptivas de las señales sonoras del oyente. L_{aeq} : nivel sonoro en decibelios equivalente a la energía acústica total ponderada durante un tiempo determinado. ¹ Abajo: representación de las múltiples fuentes oceánicas que forman un paisaje sonoro oceánico. ²



Los paisajes sonoros submarinos son dinámicos; varían en espacio y tiempo y dentro de los hábitats y entre ellos. El sonido en las profundidades del océano se propaga a tales distancias bajo el agua que los paisajes sonoros son influenciados no sólo por las condiciones locales sino también por fuentes sonoras mucho más distantes que en el aire. El paisaje sonoro submarino se compone de contribuciones (figura 2) de la actividad humana (por ejemplo, transporte marítimo, buques pesqueros, muestreadores para estudios sísmicos), procesos naturales abióticos o geofísicos (por ejemplo, viento, lluvia, hielo), y contribuciones acústicas de fuentes biológicas (por ejemplo, sonido producido a partir de movimientos de animales y vocalizaciones de mamíferos marinos, peces e invertebrados). Las flechas en una sola dirección en la figura 2 muestran que el paisaje sonoro está directamente influenciado en una sola dirección por factores antropogénicos y abióticos, y las flechas en dos direcciones indican que el sonido no está sólo influenciado, sino que también influye, sobre el componente biológico del paisaje sonoro. Por consiguiente, el paisaje sonoro subacuático no es simplemente un parámetro físico del medio ambiente que debe medirse y cuantificarse. El paisaje sonoro depende del oyente y tiene un lazo de retroalimentación donde los cambios en el paisaje sonoro tienen el potencial de impacto de comportamiento acústico y factores bióticos que influyen en la ecología conductual del ecosistema y finalmente alteran aún más el paisaje sonoro (figura 2).

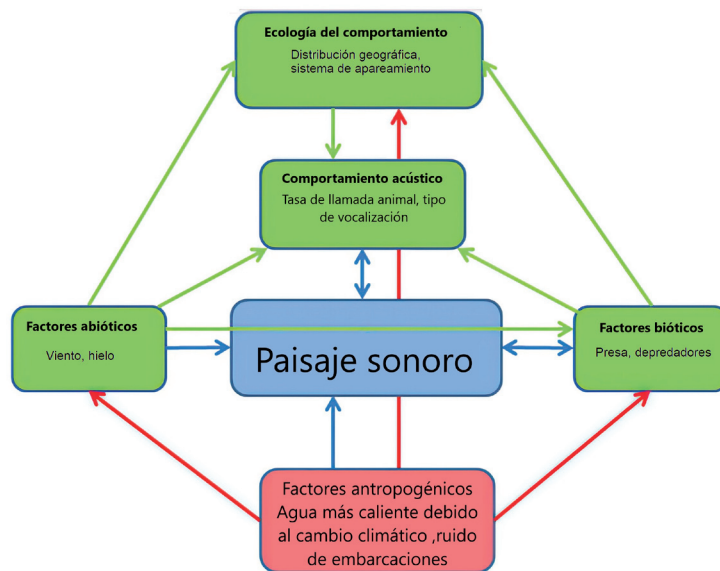


Fig. 2. Paisaje sonoro presentado en el contexto de la ecología acústica. Cajas verdes y flechas, factores naturales: ecología conductual, comportamiento acústico, y factores abióticos y bióticos que contribuyen a (flechas salientes) o impactados por (flechas entrantes) el paisaje sonoro (caja azul y flechas); caja roja y flechas, interacciones y las variaciones de la actividad humana relacionadas con el paisaje sonoro o que repercuten en él. Adaptado de van Opzeeland y Miksis-Olds. ³

El análisis del paisaje sonoro se realiza en corrientes de datos en directo o grabaciones de señales de presión recibidas de registradores acústicos pasivos desplegados en el fondo del océano o anclados en la columna de agua. Las grabaciones nos permiten observar hábitats marinos sin los efectos desconcertantes

de la presencia humana o el sesgo del muestreo. Las grabaciones de la gama completa de sonidos oceánicos tienen un ancho de banda amplio (150 kHz o más), duran períodos de meses a años, y a menudo se recogen en lugares múltiples que los investigadores comparan para encontrar similitudes y diferencias (escuche paisajes sonoros en tiempo real grabados en diferentes lugares oceánicos en <http://www.listentoteep.com>). Estos conjuntos de datos son llamados de cinco dimensiones porque tienen tiempo, frecuencia, amplitud, latitud y longitud. El objetivo del análisis del paisaje sonoro es extraer información de las grabaciones para identificar qué fuentes están presentes, las amplitudes de las fuentes, cómo interactúan y cómo los animales en el medio ambiente pueden percibir y responder a los sonidos. En los últimos años, algunos equipos de investigación han comenzado a realizar grabaciones de paisajes sonoros direccionales que aumentan los datos a seis dimensiones añadiendo la dirección de llegada (figura 3). Los sensores de presión direccionales en aguas profundas también ofrecen el potencial para medir el movimiento de partículas. Por desgracia, esta metodología no se extiende a mediciones precisas de las partículas cerca de la superficie del mar, en el fondo marino o en aguas poco profundas, ya que no está relacionado linealmente con la presión en estas regiones. El movimiento de partículas, a diferencia de la presión, es el componente del sonido percibido por la mayoría de los peces e invertebrados marinos. Su medición y percepción es un tema que requiere una amplia investigación.⁴

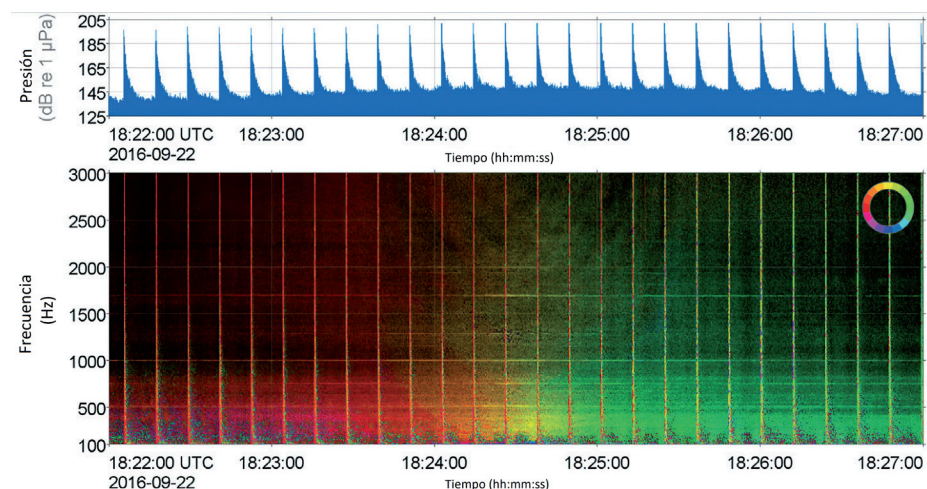


Fig. 3. Cinco minutos de datos acústicos de una nave sísmica y un cañón de aire pasando sobre un hidrófono direccional. Arriba: serie temporal de nivel de presión acústica. Abajo: espectrograma donde el color indica la dirección de llegada mostrada por la rueda de color (amarillo, Norte; azul, Sur). El sensor estaba a 60 cm del fondo marino en 110 m de agua. Tenga en cuenta que la dirección del buque cambia de color antes de los impulsos del arreglo del cañón de aire porque estaba ~100 m detrás de la nave.

Los datos de monitorización acústica pasiva (*soundscape*) pueden descomponerse de forma selectiva para comprender mejor las fuentes que configuran las características temporales, espaciales y espectrales del entorno acústico^{5,6} (por ejemplo la figura 4). Hay una amplia variedad de medidas acústicas y formatos de presentación en la literatura de paisajes marinos relacionados con los focos de cada estudio. Por ejemplo, los estudios de patrones y tendencias del

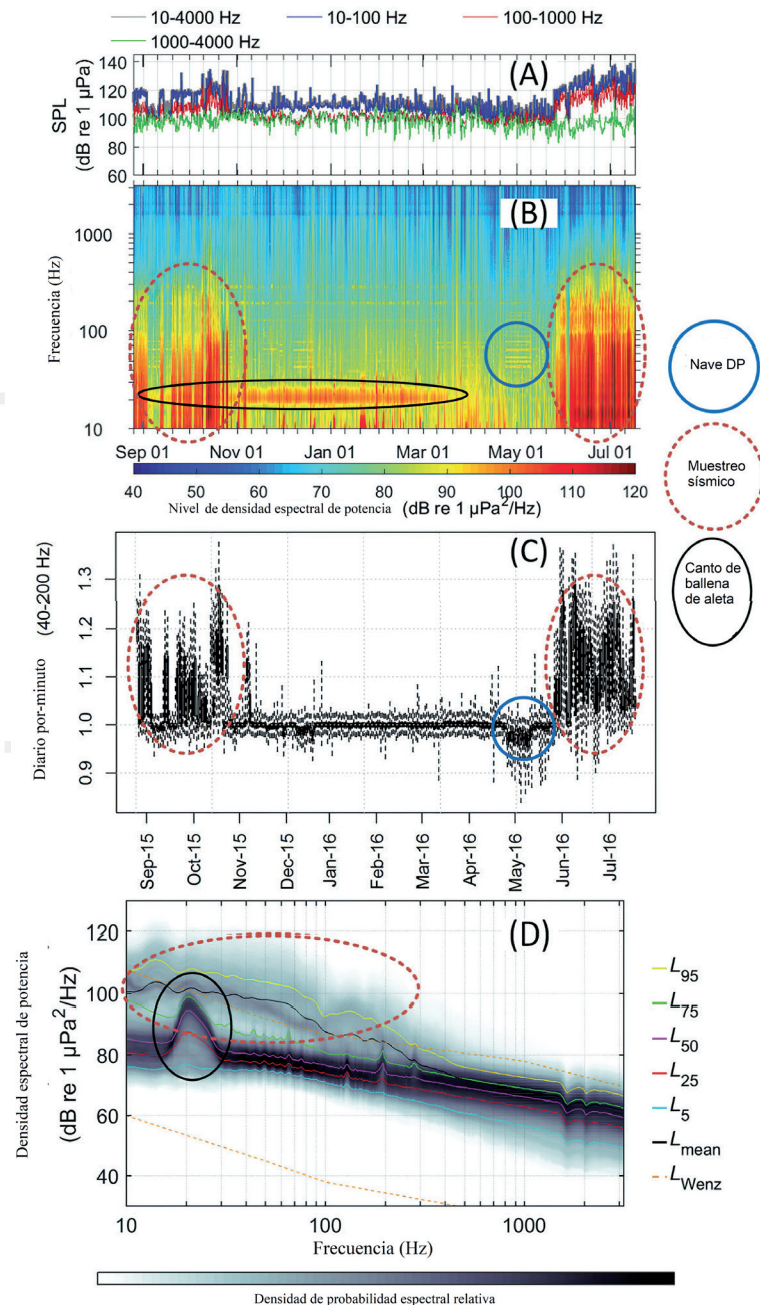


Fig. 4. Ejemplos de presentaciones de datos de paisajes sonoros utilizando un conjunto de datos de 11 meses registrados a 20 m del lecho marino en 1,280 m de agua frente a Terranova, Canadá. A: serie temporal de niveles de presión acústica limitados en banda de 1 hora (SPL). B: media espectral a largo plazo del conjunto de datos completo. C: distribuciones diarias de valores de índice de complejidad acústica de 1 minuto (ACI) para la banda de frecuencia de 40-200 Hz. Los valores inferiores a 1 indican una menor complejidad (es decir, fuentes sonoras continuas) y los superiores a 1 indican una mayor complejidad (fuentes sonoras impulsivas). D: distribución de densidades espectrales de 1 minuto de potencia, incluidos los percentiles de superación (es decir, el 5% de los valores de potencia de la densidad espectral superaron la línea L5). Elipses rayadas anaranjadas, presencia de señales sísmicas; elipses sólidas negras, ballenas aletas; círculos azules sólidos, una nave de posicionamiento dinámico distante (DP).

paisaje sonoro tienden a utilizar mediciones de los niveles de presión acústica (figura 4, A y B) y percentiles de superación del nivel sonoro (nivel sonoro que se supera N% del tiempo durante un período de tiempo especificado; figura 4D), mientras que los estudios de la biodiversidad de los ecosistemas muestran índices de diversidad acústica del paisaje sonoro representativo del número de especies vocales presentes en una zona (figura 4C). Los análisis de paisajes sonoros han proporcionado un medio para comprender mejor la influencia de los parámetros ambientales como la presencia de hielo marino y los ciclos lunares en los procesos acústicos locales ^{7,8} evaluando la calidad del hábitat y la salud de los arrecifes de coral ^{8,9} y midiendo la biodiversidad ^{10,11} para comprender mejor los impactos y riesgos de las contribuciones humanas al paisaje sonoro en la vida marina.

UTILIZACIÓN DE PAISAJES SONOROS SUBMARINOS

Durante la última década, los costes de recogida y análisis de datos de vigilancia acústica pasiva han disminuido constantemente, lo que ha dado lugar a un número creciente de estudios que exploran cómo los animales utilizan la información de su paisaje sonoro ambiental para la comunicación, orientación y navegación ^{12,13} (véase también el artículo de Slabekoorn ¹⁴ en *Acoustics Today*). El concepto de utilizar sonidos ambientales o reflejados (a diferencia de las señales de comunicación específicas) como señales de movimiento directo o de identificación de hábitats apropiados se ha identificado recientemente como un nuevo campo de estudio denominado orientación del paisaje sonoro, y el concepto también se incluye en el campo más amplio de la ecología del paisaje sonoro en la literatura científica. ^{12,13} Se ha especulado que las grandes ballenas barbadas usan señales acústicas ambientales o señales acústicas para guiar su migración. ^{15,16} Del mismo modo, se ha propuesto que las señales de los paisajes sonoros puedan proporcionar a las focas en el agua un gradiente acústico destacado entre el agua abierta y las condiciones de hielo sólido mediante el cual las focas pueden orientarse para mantener el acceso al agua abierta para respirar. ¹⁷

Los estudios de laboratorio y sobre el terreno han demostrado que tanto los invertebrados como los peces utilizan señales de los paisajes sonoros para la orientación y localización del hábitat de asentamiento apropiado. Stanley *et al.* ¹⁸ midieron el nivel de intensidad acústica requerido para provocar asentamiento y metamorfosis en varias especies de cangrejos, y Simpson *et al.* ¹⁹ mostraron que los peces de arrecifes de coral parecen responder más fuertemente a los componentes de mayor frecuencia (>570 Hz) del paisaje sonoro del arrecife. Los hábitats con mayor biodiversidad suelen asociarse a paisajes acústicos más ricos en comparación con los hábitats de baja diversidad, que en sí mismos pueden ser una señal importante para la orientación animal en el agua y el aire. ^{13,20,21}

Un ejemplo de la utilidad del análisis a largo plazo del paisaje sonoro es el estudio de los últimos 50 años en la costa oeste de los Estados Unidos. Tras una combinación de grabaciones desclasificadas de la Marina de los Estados Unidos y conjuntos de datos científicos, se ha documentado un aumento constante del sonido de baja frecuencia (10-200 Hz) que se atribuye principalmente a un aumento del transporte marítimo comercial. ²² Los niveles de ruido han aumentado en aproximadamente 3 dB/década (0.55 dB/año) hasta la década de 1980 ²³ y luego se han reducido a 0.2 dB/año. ²⁴ Las mediciones más recientes

en esta región muestran una nivelación o una ligera disminución de los niveles sonoros desde finales de la década de 1990, a pesar del aumento del número y tamaño de los buques.²⁵

La ballena azul, de aleta, jorobada, el rorcual del norte y el Brydes, y el cachalotes se comunican en la banda de frecuencia de 10 a 200 Hz; el infrasonido de las olas estrellándose en tierra (que los animales marinos probablemente utilizan para la orientación) también está en esta banda. La comprensión de cómo la vida marina utiliza esta banda de frecuencia y los efectos de las contribuciones humanas en esta misma banda es el tema de muchos estudios de paisajes sonoros. Los aumentos del transporte marítimo por sí solos no explican plenamente el aumento observado de 10 a 12 dB en la banda de 20 a 40 Hz entre 1965 y 2003.^{22,26} Las actividades de exploración y producción de petróleo y gas, así como de fuentes de energía renovables, también han aumentado los niveles sonoros totales en esta banda.²⁷ Es probable que los niveles sonoros bióticos también hayan aumentado debido a la recuperación de las poblaciones de ballenas y al efecto Lombard, que es el aumento de la amplitud de las llamadas para compensar los niveles de ruido más elevados. El efecto Lombard se ha demostrado en humanos y en muchas poblaciones animales y puede contribuir a elevar los niveles de baja frecuencia a medida que los animales vocalizan más fuerte para ser escuchados por encima del ruido.²⁸

El cambio climático está aumentando la cantidad de hielo glacial que envuelve los océanos, y a medida que los glaciares se desintegran, generan ruido de baja frecuencia con grandes niveles de origen que contribuyen al presupuesto regional de ruido durante largos períodos.²⁹ Los límites regionales de los paisajes sonoros, incluso para las frecuencias bajas que propagan grandes distancias, están infravalorados por las diferencias en el aumento del nivel sonoro a largo plazo. Aunque los estudios reportan un aumento significativo de los niveles de ruido ambiental en el Pacífico Norte, los estudios actuales en los océanos Índico, Atlántico Sur y Pacífico ecuatorial no han observado un aumento uniforme del nivel sonoro de los océanos.^{30, 31} Se sabe muy poco sobre el paisaje sonoro mundial en su conjunto, y esta es una zona activa de exploración oceánica. La teoría y las observaciones sugieren que el ruido generado por el hombre podría estar acercándose a niveles en los que podría haber efectos negativos sobre la vida marina.²⁷

MODELADO DEL PAISAJE SONORO

Hasta ahora hemos discutido la descomposición de los sonidos medidos en los puntos del océano para explorar qué fuentes están presentes y cómo conforman el espacio acústico utilizado por los seres humanos y la vida marina (figura 1). Sin embargo, también es posible estimar un paisaje sonoro combinando las firmas acústicas de fuentes regionales. El modelado de paisajes sonoros es el proceso de componer los sonidos en un entorno basado en fuentes, ubicaciones, movimientos y condiciones de propagación acústica supuestos. Los investigadores modelarán paisajes sonoros para probar algoritmos de detección, clasificación y localización en condiciones controladas o para predecir los efectos potenciales de las actividades humanas. Tradicionalmente se han hecho supuestos de simplificación para reducir la carga computacional, especialmente para el ruido de

la superficie del mar causado por el viento y las olas y la pérdida de propagación acústica. A medida que aumenta la velocidad de las computadoras, las fuentes de sonido más avanzadas y los modelos de propagación permiten el desarrollo cada vez más rápido de algoritmos y una mejor comprensión de la propagación del sonido, así como la autorización solicitudes de estudio de exposición incidental a la vida marina durante actividades industriales, científicas o militares (por ejemplo, figura 5).³²

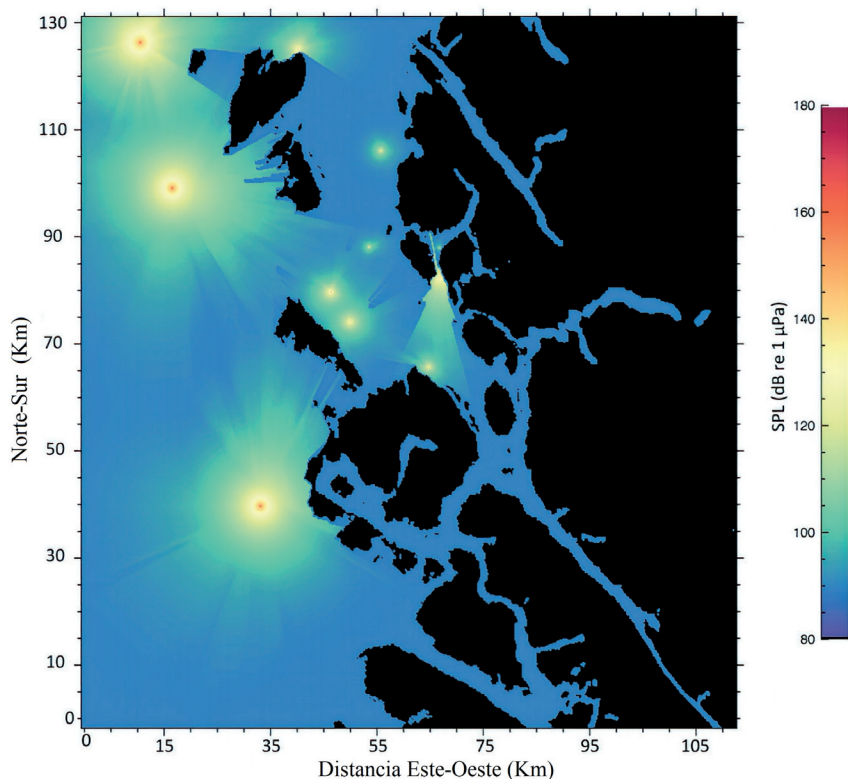


Fig. 5. Modelo del SPL a partir de una instantánea de la ubicación de los buques del sistema de identificación automatizada, que se generó como parte de la investigación de los efectos acumulativos del tráfico de buques actual y adicional proyectado en el puerto de Prince Rupert, Columbia Británica. Figura proporcionada por JASCO Applied Sciences, Nueva Escocia, Canadá, y la Autoridad Portuaria Prince Rupert.

MEDICIONES ACÚSTICAS PARA LA CONSERVACIÓN

Entender los efectos del ruido en la vida marina motiva muchas mediciones de paisajes marinos sonoros. Los efectos del ruido a menudo se agrupan en cuatro categorías: (1) muerte y lesión, (2) efectos fisiológicos, (3) alteración del comportamiento, y (4) enmascaramiento de sonidos. La protección de la vida marina contra la muerte y las lesiones ha sido el centro de atención de la industria y los fondos gubernamentales recientes. Como resultado, sabemos más sobre qué niveles de sonidos y métricas predicen lesiones, especialmente a los mamíferos marinos, que aquellos asociados con cambios de comportamiento y enmascaramiento. Se utilizan dos mediciones de umbral para estimar el conjunto de lesiones en la vida marina. El nivel máximo de presión acústica del impulso (por ejemplo, explosión o pilotaje) se utiliza para evaluar la posibilidad

de daño fisiológico a los tejidos (por ejemplo, barotrauma en los peces). La energía sonora que puede dañar la audición en la vida marina es estimada por el SEL, que acumula energía sonora a lo largo del tiempo.^{33,34} El SEL en el medio marino es una dinámica complicada relacionada con la distancia de origen, las condiciones de propagación acústica y el solapamiento entre el contenido de frecuencia de la fuente y la sensibilidad auditiva de los animales receptores. Para la exposición al sonido humano, utilizamos la ponderación familiar A, y se proponen funciones de ponderación similares para cinco grupos de mamíferos marinos.³⁵ Aún no hemos entendido lo suficiente la audición de peces, tortugas marinas e invertebrados como para proponer funciones de ponderación para estos grupos.

Los estudios de alteración del comportamiento y enmascaramiento auditivo están aumentando ahora que los efectos agudos del ruido se entienden mejor. Estos estudios están directamente asociados con el concepto de un paisaje sonoro; ¿cómo interpreta y reacciona la vida marina al sonido? La mayoría de los estudios de alteración del comportamiento relacionan la reacción con el nivel de presión sonora en el momento de la reacción. Se requiere mucho trabajo adicional para entender mejor qué medidas, incluyendo el movimiento de partículas, son apropiadas para entender la interrupción del comportamiento en la mayoría de los taxones. El enmascaramiento ocurre cuando la capacidad de detectar o reconocer un sonido de interés se degrada por la presencia de otro sonido, el enmascarador.³⁶ Las señales submarinas pueden ser enmascaradas por componentes naturales del paisaje sonoro, como el hielo marino, las interacciones entre el viento y las olas, la lluvia, los coros de animales distantes o los ataques vocales, así como por actividades trompogénicas. Mientras que los estudios de lesiones inducidas por el sonido o trastornos del comportamiento se centran únicamente en la señal de interés, los estudios de enmascaramiento deben cuantificar el ruido ambiente para estimar la relación señal-ruido, que es crítica para el apareamiento cuando un animal puede detectar una señal.

ESTANDARIZANDO LA MEDICIÓN DE LOS PAISAJES SONOROS MARINOS

La aplicación de mediciones de paisajes sonoros en estudios que evalúan los efectos del sonido humano, cartografían la distribución de la vida marina sonífera y comprenden el papel del sonido en la ecología de la vida marina. Se trata de una comunidad mucho más grande que se dedica a la monitorización acústica pasiva y al análisis del paisaje sonoro. Como resultado, la comunidad ha identificado la necesidad de desarrollar terminología y métodos estándar que ayuden a asegurar que la investigación y las mediciones de cumplimiento sean repetibles y comparables entre los proyectos. La norma 18405 de la Organización Internacional de Normalización (ISO) sobre acústica subacuática (ISO, 2017) incluye por primera vez una definición de paisaje sonoro subacuático.³⁷

Acústica subacuática: Caracterización del sonido ambiental en términos de sus atributos espaciales, temporales y de frecuencia y los tipos de fuentes que contribuyen al campo sonoro.

El sonido ambiente es el campo sonoro medido en ausencia del ruido relacionado con el sistema de medición. El concepto de paisaje sonoro tiene

sus raíces en la comprensión de cómo los seres humanos interpretan el entorno sonoro urbano. La definición de la acústica subacuática no incluye elementos de percepción porque no podemos saber de manera concluyente cómo la vida marina interpreta los sonidos. La norma ISO 18405 proporciona definiciones precisas de terminología acústica subacuática que ayudarán a los grupos a intercambiar resultados utilizando una notación común.³⁸

La terminología de la norma ISO 18405 no define cómo describir un paisaje sonoro. Dada la amplia gama de métricas e índices que pueden utilizarse para describir un paisaje sonoro y la incertidumbre que rodea los efectos y la percepción del ruido, llegar a un consenso entre los investigadores llevará tiempo. El equipo de la Red Atlántica de Observación de Ecosistemas de Aguas Profundas (AD-EON; <https://adeon.unh.edu/>) elaboró tres normas del proyecto, basadas en la terminología de la norma ISO 18405, que definen las métricas de referencia, la recopilación de datos y los datos métodos de procesamiento que el proyecto utilizará para medir y documentar el paisaje sonoro. El equipo del proyecto espera que los documentos (disponibles en el sitio web del proyecto) iniciarán un debate que conduzca a un consenso sobre la descripción mínima de un paisaje sonoro submarino, probablemente a través de un nuevo grupo de trabajo en el Comité Técnico 43 de la ISO. (actualizado en 2018)

Sonido oceánico:

Una variable oceánica esencial

La ampliación de los esfuerzos para medir los paisajes marinos concuerda con la mayor atención que se presta a los sistemas de observación de los océanos. El Sistema Mundial de Observación de los Océanos (SMOO) fue desarrollado por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO en torno a tres temas fundamentales para comprender mejor el clima oceánico, los ecosistemas y las repercusiones y vulnerabilidades humanas: 1) servicios en tiempo real (www.goosoocean.org). El sistema coordinado de observatorios oceánicos a largo plazo se basa en un marco diseñado para ser flexible, adaptarse a la innovación científica, abordar las necesidades de la sociedad y ofrecer un sistema de observación con una base de usuarios máxima y un impacto social. El marco del SMOO relaciona todas las observaciones de los océanos con vehículos todo terreno para garantizar mediciones que atraviesan las plataformas de observación y representan el plan más rentable para proporcionar una cobertura mundial opcional para cada vehículo todo terreno. Los grupos de expertos del SMOO consideran las EOVS en términos de preparación científica, relevancia social y viabilidad.

Las diversas aplicaciones de la información obtenida del estudio de los océanos inspiraron al Programa Internacional de Experimentos Oceánicos Silenciosos (www.IQOE.org) para proponer Ocean Sound como EOVS al Grupo de Biología y Ecosistemas del SMOO para su inclusión en la red del SMOO. Aunque el sonido de los océanos es una medida física característica del medio marino, se consideró que el Grupo de Biología y Ecosistemas era el más apropiado para la presentación, ya que la mayoría de los productos oceánicos sanos derivados de su medición tienen aplicaciones biológicas y ecosistémicas directas o indirectas relacionadas con la economía, la alimentación, la conservación y el clima,

y la sostenibilidad (tabla 1). Ocean Sound se ocupa de 7 de las 10 presiones sociales del SMOO y de los 9 motores sociales del SMOO (tabla 1). La escala de observación de las redes de sonido oceánico y las plataformas de grabación permitirá estudiar fenómenos que van desde eventos acústicos únicos hasta tendencias a largo plazo en el sonido ambiental (figura 6). El Ocean Sound EOVS forjará importantes avances en nuestra comprensión de los paisajes sonoros oceánicos, los efectos que tiene en la vida marina y cómo se puede utilizar el monitoreo acústico para evaluar la biodiversidad y la salud de los ecosistemas.

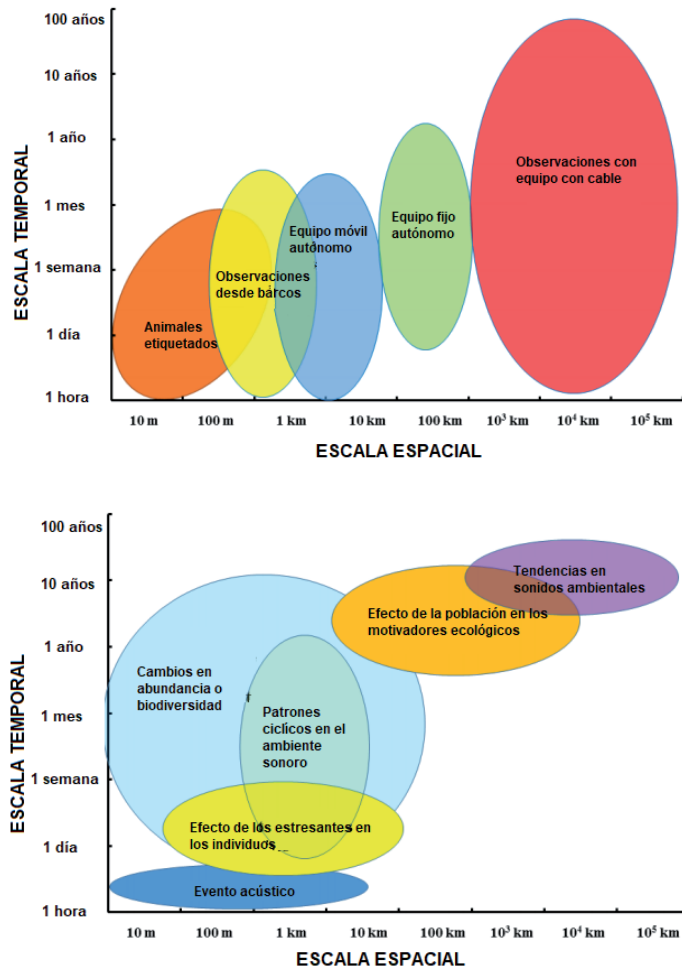


Fig. 6. Arriba: escalas observacionales de plataformas de registro de la variable oceánica esencial de Ocean Sounds (EOV). Los sensores de registro pasivo varían en tamaño y capacidad de registro desde pequeñas etiquetas de despliegue cortas conectadas directamente a los animales hasta sensores autónomos de capacidad intermedia a observatorios de gran escala con sensores cableados directamente a la costacapacidad de registro de términos. Bot-tom: fenómenos acústicos que serán captados por la gama Ocean Sound EOVS en escala desde la detección acústica única de un buque que pasa o terremotos no-acuáticos hasta tendencias a largo plazo en el sonido ambiental del océano durante décadas. Ocean Sound apoya la derivación de métricas e índices acústicos que estiman la biodiversidad del ecosistema, la abundancia de ballenas cantantes y los efectos del cambio ambiental a nivel individual y poblacional.

Tabla 1. Información básica sobre las variables oceánicas para el sonido oceánico.

Subvariables	Presión acústica y movimiento de partículas
Productos derivados	Campo sonoro y tendencias, Niveles de presión sonora, Niveles de espectro, Niveles de banda (por ejemplo, banda de octava), Paisaje sonoro, Niveles de fuente, e Indicadores de biodiversidad
Variables de apoyo	Fuentes: Distribución y características de las fuentes antropógenas, abióticas y bióticas. Parámetros de propagación: Perfiles de velocidad acústica; Corrientes oceánicas y otros fenómenos oceanográficos físicos; Condiciones frontera (por ejemplo, rugosidad de la superficie del mar, características del hielo marino [por ejemplo, rugosidad y espesor], y del fondo marino [batimetría, propiedades geoacústicas]). Receptores: Sensibilidad hidrófona en función de la frecuencia y direccionalidad del sistema receptor
Impulsores sociales	(1) Necesidad de acceso a los conocimientos científicos y a los datos, (2) Crecimiento y desarrollo económico sostenible, (3) Conservación de la biodiversidad y los ecosistemas, (4) Uso sostenible de la biodiversidad y los recursos en general, (5) Calidad y salud medioambientales, (6) Creación de capacidad y transferencia de tecnología, (7) Seguridad alimentaria, (8) Prevención de amenazas y mitigación de los efectos, y (9) Mejorar la gestión mediante un enfoque integrado de los ecosistemas.
Presiones sociales	(1) Cambio climático, 2) acidificación de los océanos, 3) fenómenos meteorológicos extremos, 4) pérdida de recursos (hábitats y biodiversidad), 6) minería, 9) ruido y 10) desarrollo costero.

VISIÓN AL FUTURO

En la última década se ha avanzado considerablemente en el estudio y la aplicación de los paisajes sonoros submarinos, pero todavía hay una brecha significativa en la aplicación de la construcción perceptiva de paisajes sonoros submarinos a la vida marina en términos de enmascaramiento y sentido del espacio comunitario como se refleja en la literatura del paisaje sonoro humano. El reto de integrar la percepción en las aplicaciones del paisaje sonoro subacuático se refiere a la de los colegas del paisaje sonoro terrestre que están lidiando con la percepción del paisaje sonoro en la vida silvestre. Probablemente nunca entenderemos la percepción de todos los taxones animales para identificar y cuantificar su experiencia de los paisajes submarinos y terrestres. Un paso adelante que se puede lograr es comprender mejor las capacidades auditivas y la variabilidad entre los individuos y las especies y en términos del contexto relacionado con la edad, el género, la exposición previa al ruido y el estado de comportamiento. Se trata de un esfuerzo elevado porque existen diversos órganos de protección del sonido empleados bajo el agua, por ejemplo, orejas de mamíferos similares a las nuestras, órganos otolitos en peces, y órganos estatocistas en invertebrados. Este conocimiento es fundamental para ponderar adecuadamente los paisajes sonoros de diferentes grupos de animales a fin de evaluar los efectos relacionados con la exposición al sonido o el entorno acústico cambiante.

También es importante dejar claro que este artículo no aborda directamente el componente de movimiento de partículas del sonido en el paisaje sonoro. Sin embargo, reconocemos que este es un componente increíblemente importante del paisaje sonoro para una mayoría de taxones marinos (por ejemplo, peces, invertebrados) que sienten este componente del sonido.⁴ Esta brecha existe porque históricamente la instrumentación para medir el movimiento de partículas en el océano abierto no ha sido fácilmente accesible para la comunidad investigadora. A medida que la nueva tecnología esté disponible para medir este parámetro del campo sonoro bajo el agua, esperamos emocionantes avances en el conocimiento y las aplicaciones del paisaje sonoro submarino.

El último y posiblemente el desafío abierto más importante asociado con los paisajes sonoros oceánicos es cómo comprender mejor las mediciones acústicas y los modelos en seis dimensiones. La naturaleza interdisciplinaria de la investigación del paisaje sonoro debe ampliarse de nuevo para abarcar a los informáticos, a los psicoanalistas cognitivos y a los expertos en tecnología de Internet para avanzar en la percepción de paisajes sonoros submarinos o imágenes de paisajes sonoros bidimensionales para abarcar combinaciones innovadoras de representación visual y auditiva para capturar completamente la complejidad del paisaje sonoro de una manera que podamos percibir mejor.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Arthur Popper sus invaluable comentarios y comentarios sobre los borradores de este documento. Jennifer L. Miksis-Olds fue financiada por el Bureau of Ocean Energy Management Contract ADEON M16PC00003.

REFERENCIAS

1. Jennings, P., and Cain, R. (2013). A framework for improving urban soundscapes. *Applied Acoustics* 74(2), 293-299.
2. De la Estrategia de Ruido Oceánico de la NOAA. Disponible en <http://acousticstoday.org/nefsc>
3. van Opzeeland, I. C., and Miksis-Olds, J. L. (2012). Acoustic ecology of pinnipeds in polar habitats. In Eder, D. L. (Ed.), *Aquatic Animals: Biology, Habitats, and Threats*. Nova Science Publishers, Inc., New York, pp. 1-52.
4. Hawkins, A. D., and Popper, A. N. (2017). A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. *ICES Journal of Marine Science* 74, 635-651.
5. Mann, D. A. (2012). Remote sensing of fish using passive acoustic monitoring. *Acoustics Today* 8(3), 8-15.
6. Au, W. W. L., and Lammers, M. O. (Eds). (2016). *Listening in the Ocean*. Springer-Verlag, New York.
7. Miksis-Olds, J. L., Stabeno, P. J., Napp, J. M., Pinchuk, A. I., Nystuen, J. A., Warren, J. D., and Denes, S. L. (2013a). Ecosystem response to a temporary sea ice retreat in the Bering Sea. *Progress in Oceanography* 111, 38-51.

8. Staatterman, E., Paris, C. B., DeFerrari, H. A., Mann, D. A., Rice, A. N., and D'Alessandro, E. K. (2014). Celestial patterns in marine soundscapes. *Marine Ecology Progress Series* 508, 17-32.
9. McWilliam, J. N., and Hawkins, A. D. (2013). A comparison of inshore marine soundscapes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 446, 166-176.
10. Parks, S. E., Miksis-Olds, J. L., and Denes, S. L. (2014). Assessing marine ecosystem acoustic diversity across ocean basins. *Ecological Informatics* 21, 81-88.
11. Harris, S. A., Shears, N. T., and Radford, C. A. (2016). Ecoacoustic indices as proxies for biodiversity on temperate reefs. *Methods in Ecology and Evolution* 7, 713-724.
12. Slabbekoorn, H., and Bouton, N. (2008). Soundscape orientation: A new field in need of sound investigation. *Animal Behaviour* 76, e5-e8.
13. Pijanowski, B. C., Villanueva-Rivera, L. J., Dumyahn, S. L., Farina, A., Krause, B. L., Napoletano, B. M., Gage, S. H., and Pieretti, N. (2011). Soundscape ecology: The science of sound in the landscape. *BioScience* 61, 203-216.
14. Soundscape Ecology of the Anthropocene – Hans Slabbekoorn
15. Able, K. P. (1980). Mechanisms of orientation, navigation, and homing. In Gauthreaux, S. A., Jr. (Ed.), *Animal Migration, Orientation, and Navigation*. Academic Press, New York, pp. 283-373.
16. Kenney, R. D., Mayo, C. A., and Winn, H. E. (2001). Migration and foraging strategies at varying spatial scales in western North Atlantic right whales: A review of hypothesis. *Journal of Cetacean Research Management* 2, 251-260.
17. Miksis-Olds, J. L., and Madden, L. E. (2014). Environmental predictors of ice seal presence in the Bering Sea. *PLoS ONE* 9, e106998.
18. Stanley, J. A., Radford, C. A., and Jeffs, A. G. (2011). Behavioural response thresholds in New Zealand crab megalopae to ambient underwater sound. *PLoS ONE* 6, e28572.
19. Simpson, S. D., Meekan, M. G., Jeffs, A., Montgomery, J. C., and McCauley, R. D. (2008). Settlement-stage coral reef fish prefer the higher-frequency invertebrate-generated audible component of reef noise. *Animal Behaviour* 75, 1861-1868.
20. Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O., and Duvail, S. (2008). Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLoS ONE* 3, e4065.
21. Stanley, J. A., Radford, C. A., and Jeffs, A. G. (2012). Location, location, location: Finding a suitable home among the noise. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 270, 3622-3631.
22. Ross, D. (2005). Ship sources of ambient noise. *IEEE Journal of Ocean Engineering* 30, 257-261.
23. McDonald, M. A., Hildebrand, J. A., and Wiggins, S. M. (2006). Increases in deep ocean ambient noise in the Northwest Pacific west of San Nicolas Island, California. *The Journal of the Acoustical Society of America* 120, 711-717.

24. Chapman, N. R., and Price, A. (2011). Low frequency deep ocean ambient noise trend in the Northeast Pacific Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America* 129, EL161-EL165.
25. Andrew, R. K., Howe, B. M., and Mercer, J. A. (2011). Long-time trends in ship traffic noise for four sites off the North American West Coast. *The Journal of the Acoustical Society of America* 129, 642-651.
26. Ross, D. (1993). On ocean underwater ambient noise. *Acoustic Bulletin* 18, 5-8.
27. Boyd, I. L., Frisk, G., Urban, E., Tyack, P., Ausubel, J., Seeyave, S., Cato, D., Southall, B., Weise, M., Andrew, R., Akamatsu, T., Dekeling, R., Erbe, C., Farmer, D., Gentry, R., Gross, T., Hawkins, A., Li, F., Metcalf, K., Miller, J. H., Moretti, D., Rodrigo, C., and Shinke, T. (2011). An International Quiet Ocean Experiment. *Oceanography* 24, 174-181.
28. Tyack, P. L. (2008). Implications for marine mammals of large-scale changes in the marine acoustic environment. *Journal of Mammalogy* 89, 549-558.
29. Dziak, R., Fowler, M. J., Matsumoto, H., Bohnenstiehl, D. R., Park, M., Warren, K., and Lee, W. S. (2013). Life and death sounds of iceberg A53a. *Oceanography* 26, 10-12.
30. Miksis-Olds, J. L., Bradley, D. L., and Niu, X. M. (2013b). Decadal trends in Indian Ocean ambient sound. *The Journal of the Acoustical Society of America* 134, 3464-3475.
31. Miksis-Olds, J. L., and Nichols, S. M. (2016). Is low frequency ocean sound increasing globally? *The Journal of the Acoustical Society of America* 139, 501- 511.
32. Aulancier, F., Simard, Y., Roy, N., Gervaise, C., and Bandet, M. (2017). Effects of shipping on marine acoustic habitats in Canadian Arctic estimated via probabilistic modeling and mapping. *Marine Pollution Bulletin* 125(1-2), 115-131.
33. Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. A., Bartol, S., Carlson, T. J., Coombs, S., Ellison, W. T., Gentry, R. L., Halvorsen, M. B., Lokkeborg, S., Rogers, P., Southall, B. L., Zeddies, D. G., and Tavalga, W. N. (2014). *ASA S3/SC1.4 TR-2014 Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report Prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and Registered with ANSI*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland.
34. National Marine Fisheries Service (NMFS). (2016). *Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing: Underwater Acoustic Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts*. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-55, NOAA, US Department of Commerce, Silver Spring, MD. Available at <http://acousticstoday.org/noaaagt>. Accessed October 16, 2017.
35. Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Gentry, R. L., Greene, C. R., Jr., Kastak, D., Ketten, D. R., Miller, J. H., Nachtigall, P. E., and Richardson, W. J. (2007). Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals* 33(4), 411-521.

36. Dooling, R. J., Leek, M. R., and Popper, A. N. (2015). Effects of noise on fishes: What we can learn from humans and birds. *Integrative Zoology* 10, 29-37.
37. International Organization for Standardization (ISO). (2017).
38. Underwater Acoustics—Terminology. Standard ISO/DIS 18405.2:2017, prepared by Technical Committee ISO/TC 43, Acoustics, Subcommittee SC 3, Under- water Acoustics, ISO, Geneva, Switzerland. Available at <https://www.iso.org/standard/62406.html>. Accessed October 16, 2017.

Características higroscópicas de ocho maderas mexicanas

Javier Ramón Sotomayor-Castellanos, Israel Macedo-Alquicira,
Eduardo Mendoza-González

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
madera999@yahoo.com

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar la densidad básica, el contenido de humedad inicial, el máximo contenido de humedad, el punto de saturación de la fibra, el porcentaje de pared celular y el porcentaje de espacios vacíos de ocho maderas mexicanas: Cupressus lindleyi, Cedrela odorata, Swietenia macrophylla, Tabebuia donnell-smithii, Fraxinus uhdei, Fagus mexicana, Dalbergia palo-escrito y Guazuma ulmifolia. La variabilidad de las características higroscópicas de las maderas estudiadas puede explicarse por las diferencias en las particularidades anatómicas propias de cada especie. Sin embargo, sus correlaciones estadísticas, así como sus magnitudes se sitúan en los rangos reportados en la bibliografía.

PALABRAS CLAVE

Variabilidad, hidratado de la madera, secado de la madera, correlaciones estadísticas.

ABSTRACT

The objective of the research was to determine the basic density, the initial moisture content, the maximum moisture content, the fiber saturation point, the cell wall percentage and the void space percentage of eight Mexican woods: Cupressus lindleyi, Cedrela odorata, Swietenia macrophylla, Tabebuia donnell-smithii, Fraxinus uhdei, Fagus mexicana, Dalbergia palo-escrito and Guazuma ulmifolia. The variability of the hygroscopic characteristics of the woods studied can be explained by the differences in the anatomical characteristics of each species. However, their magnitudes are within the ranges reported in the bibliography.

KEYWORDS

Variability, wood hydration, wood drying, statistical correlations.

INTRODUCCIÓN

La demanda de materiales sostenibles y procesos responsables con el ambiente en la industria de la construcción ha generado un renovado interés en la investigación de las propiedades esenciales de la madera y sus aplicaciones derivadas, específicamente, para el desarrollo de sistemas de adaptación arquitectónicos de baja tecnología. La capacidad de diseñar compuestos de madera cuyo estado de tensión permanezca limitado bajo los cambios de la humedad ambiental es beneficiosa para cualquier aplicación de ingeniería, sometida a una variación repetida de la carga, como son los sistemas adaptativos.¹

La investigación de la densidad y las características higroscópicas de la madera encuentran aplicación práctica en el diseño de productos y en la concepción de piezas de ingeniería de este material. Otra aplicación a nivel industrial es el comportamiento y control de procesos industriales. Por ejemplo, el punto de saturación de la fibra, el porcentaje de espacios vacíos, el porcentaje de pared celular y el máximo contenido de humedad de una especie son parámetros necesarios para optimizar los procesos de secado y/o de impregnado de madera.²

El fenómeno de la higroscopía en la madera sólida se observa desde dos escalas: a nivel micro, se estudia la proporción de los componentes químicos fundamentales de la madera que determinan sus propiedades higroscópicas.³ A nivel macro, se analiza el acomodo relativo de los tejidos celulares que forman capas de crecimiento, lo que resulta en las propiedades de anisotropía de la madera.⁴

Las investigaciones sobre el fenómeno de higroscopía están orientadas preferentemente a: 1. Caracterizar la expansión y/o la contracción dimensional de la madera ocasionadas por tratamientos de humidificación y/o de secado;^{5,6} 2. Determinar los parámetros relacionados con la higroscopicidad de la pared celular de la madera, como son el punto de saturación de la fibra, el máximo contenido de humedad que puede contener la madera, las proporciones de la pared celular y de los espacios vacíos del tejido celular;^{2,7,8} 3. Mejorar la estabilización dimensional de la madera por tratamientos químicos,⁹⁻¹¹ térmicos^{12,13} y mecánicos;^{1,14-16} 4. Identificar caracteres intrínsecos de la madera como factor de variación dimensional;^{3,17,18} y 5. Estudiar su estructura anatómica^{19,20} y su composición química^{21,22} como agentes que afectan el fenómeno de higroscopía.

La información sobre las características higroscópicas de maderas endémicas de México está recopilada por Tamarit y Fuentes,² Tamarit y López,²³ Silva²⁴ y Bárcenas.²⁵ Debido a la biodiversidad en las características anatómicas entre especies y a las particularidades en los procedimientos experimentales utilizados, la bibliografía reporta una amplia variedad en las magnitudes de los parámetros calculados. Con excepción de Torelli y Gorišek^{26,27} quienes retoman los datos del Estudio promocional de 43 especies de la Selva Lacandona, realizado en 1980 [Anexo] y publicado por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1982),²⁸ no hay un estudio intensivo de las características higroscópicas medibles durante procesos controlados de humidificación y secado. Así, parece razonable la caracterización de su comportamiento higroscópico desde un enfoque de análisis especie por especie y la síntesis integral de resultados obtenidos en condiciones experimentales similares.

El objetivo de la investigación fue determinar las características higroscópicas de ocho maderas mexicanas: *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., *Cedrela odorata* L., *Swietenia macrophylla* King, *Tabebuia donnell-smithii* Rose, *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh, *Fagus mexicana* Martínez, *Dalbergia palo-escrito* Rzed. & Guridi-Gómez y *Guazuma ulmifolia* Lam. Algunas de estas características de las especies en estudio están reportadas en investigaciones anteriores. Con todo, los resultados de la presente investigación son originales e inéditos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material experimental proviene del banco de maderas que forma parte del programa de caracterización física y mecánica de especies mexicanas, del Laboratorio de Mecánica de la Madera, en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. La madera se almacenó en una cámara de acondicionamiento (temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; humedad relativa del aire de $65\% \pm 5\%$) hasta que su peso fue constante. Para cada una de las especies, se recortaron 18 probetas con dimensiones de $0.02\text{ m} \times 0.02\text{ m} \times 0.06\text{ m}$ alineados en las direcciones radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) respectivamente.

Las pruebas de higroscopía consistieron en las siguientes etapas: 1. Medición del peso y las dimensiones de las probetas en estado de humedad inicial de la madera; 2. Hidratación de las probetas en un baño de agua con temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 72 horas; 3. Medición del peso y las dimensiones de las probetas en estado saturado después del tratamiento de hidratado; 4. Secado de las probetas en un horno con temperatura de $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 48 horas; 5. Medición del peso y las dimensiones de las probetas en estado anhidro después del tratamiento de secado. La figura 1 ilustra el contenido de humedad en los diferentes estados de la madera en función del tiempo de hidratado y de secado. La tabla I presenta las ecuaciones utilizadas y los símbolos utilizados para calcular los parámetros estudiados.

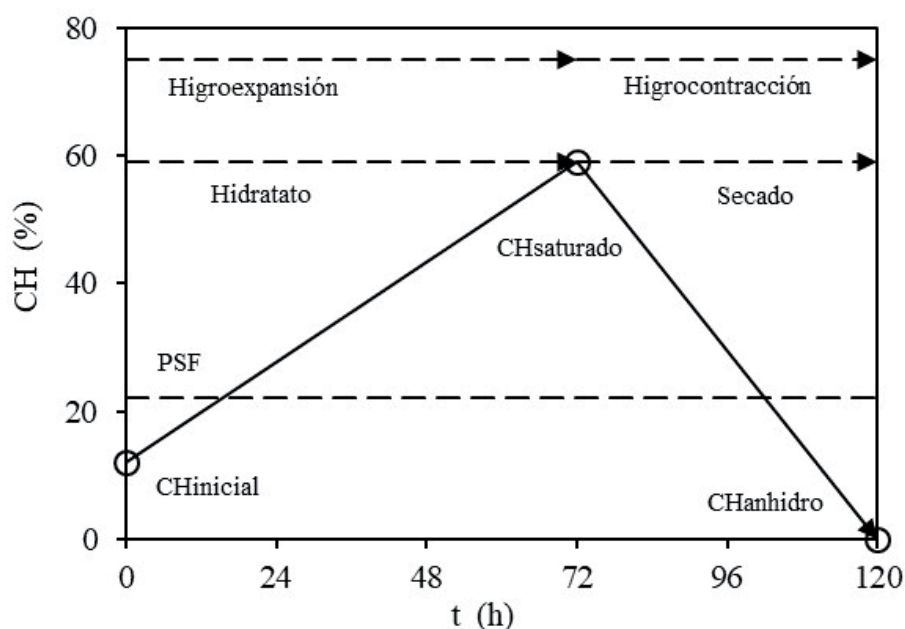


Fig 1. Contenido de humedad (CH) en función del tiempo en las pruebas de higroscopía.

Tabla I. Parámetros, ecuaciones y símbolos utilizados.

Ecuaciones	No.	Referencias
$CH_{ini} = ((P_{ini} - P_{anhidro})/P_{anhidro}) \times 100$	(1)	29
$\rho_0 = P_{anhidro}/V_{sat}$	(2)	30
$MCH = ((1530 - \rho_0)/(1530 \times \rho_0)) \times 100$	(3)	2
$PC = (\rho_0/1530) \times 100$	(4)	2
$EV = (1 - \rho_0/1530) \times 100$	(5)	2
$PSF = ((V_{sat} - V_{anhidro})/V_{sat}) \times (100/0.9 \times \rho_0)$	(6)	7
Símbolos	Subíndices	
CH = Contenido de humedad (%)	ini = Estado de humedad inicial	
ρ_0 = Densidad básica (kg m ⁻³)	anhidro = Estado de humedad anhidro	
P = Peso (kg)	sat = Estado de humedad saturado	
V = Volumen (m ³)	Nota: el valor constante de 1530 (kg m ⁻³) en las ecuaciones (4) y (5) es el de la gravedad específica de la sustancia madera. ²	
MCH = Máximo contenido de humedad (%)		
PC = Porcentaje de pared celular (%)		
EV = Porcentaje de espacios vacíos (%)		
PSF = Punto de saturación de la fibra (%)		

DISEÑO EXPERIMENTAL

La unidad experimental consistió en madera de ocho especies: *C. lindleyi*, *C. odorata*, *S. macrophylla*, *T. donnell-smithii*, *F. uhdei*, *F. mexicana*, *D. palo-escrito* y *G. ulmifolia*. La estrategia experimental se orientó hacia la comparación de resultados especie por especie, la cual se consideró el factor de variación clasificado en ocho niveles. Se evaluaron 18 réplicas (probetas) de cada una de ellas. Así, se estudiaron 144 probetas agrupadas en ocho muestras independientes. Las variables de respuesta fueron: contenido de humedad inicial (ecuación 1), densidad básica (ecuación 2), máximo contenido de humedad (ecuación 3), punto de saturación de la fibra (ecuación 4), porcentaje de pared celular (ecuación 5) y porcentaje de espacios vacíos (ecuación 6). Para cada muestra se determinaron su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma / \mu$).

Para verificar la homogeneidad en las variables densidad básica y contenido de humedad correspondiente al estado inicial de la madera, se realizaron pruebas de normalidad en las distribuciones de sus datos. El criterio de demarcación para aceptar normalidad fueron valores del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo [-2, +2]. Asimismo, se realizaron pruebas de verificación (Ver-var) y análisis de varianza (Anova). Se verificó la hipótesis nula $H_0: \mu_1 + \mu_2 = 0$, donde μ_1 y μ_2 representan las medias de las muestras y se contrastó con la hipótesis alterna $H_1: \mu_1 + \mu_2 \neq 0$. Se realizaron pruebas de rangos múltiples con el criterio de no aceptar diferencias estadísticamente significativas entre niveles (especies) que comparten una misma columna de X.

Todas las pruebas estadísticas se efectuaron para un nivel de confianza de 95 %. Así, el criterio de demarcación para aceptar una diferencia estadísticamente

significativa fue un valor de $P(\alpha = 0.05) < 0.05$. Se evaluaron correlaciones lineales ($y = ax \pm b$) y potencia ($y = ax^b$) y se determinaron los coeficientes de determinación (R^2) de las variables de respuesta en función de la densidad básica. Las ponderaciones para calificar la intensidad de las correlaciones fueron los valores del coeficiente de determinación propuestos por Tippner *et al.*³¹ correlación muy alta: $1 \geq R^2 \geq 0.9$; correlación alta: $0.9 > R^2 \geq 0.7$; correlación media: $0.7 > R^2 \geq 0.4$; correlación baja: $0.4 > R^2 \geq 0.2$; y correlación nula: $R^2 < 0.2$. Por último, los resultados de esta investigación se compararon con datos de la bibliografía adaptados de Torelli y Gorišek.^{26, 27}

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de humedad

Para las ocho maderas, los valores promedio del contenido de humedad inicial fluctuaron entre un mínimo de 8.1 % (*D. palo-escrito*) y un máximo de 9.7 % (*F. mexicana*) y su variación entre especies refleja un coeficiente de variación del 6 % (tabla II). Al interior de cada especie, el contenido de humedad varió desde 6 % (*F. mexicana*) hasta 17 % (*T. donnell-smithii*) (tabla III). Por su parte, los valores del sesgo y apuntamiento estandarizados, obtenidos de las pruebas de normalidad en las muestras homogéneas de 18 probetas cada una, se ubican al interior del intervalo que satisface el criterio de demarcación $[-2 - +2]$, lo que permite considerar que estos resultados corresponden a distribuciones normales. Asimismo, las pruebas de rangos múltiples indican grupos homogéneos para todas las especies. Estos resultados sugieren que el contenido de humedad inicial fue homogéneo en las probetas y no interviene de manera significativa en el análisis subsiguiente. El contenido de humedad inicial es calculado con la ecuación (1) a partir de mediciones directas del peso inicial y el peso en estado anhidro (figura 1).

Tabla II. Densidad básica y características higroscópicas.

Especies	ρ_0 (kg m ⁻³)	CH _{ini} (%)	PSF (%)	MCH (%)	PC (%)	EV (%)
<i>Cupressus lindleyi</i>	388	8.7	20	194	25	75
<i>Cedrela odorata</i>	439	8.9	25	171	29	71
<i>Swietenia macrophylla</i>	460	8.7	20	153	30	70
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	522	8.4	21	127	34	66
<i>Fraxinus uhdei</i>	528	9.5	20	125	35	65
<i>Fagus mexicana</i>	515	9.7	27	129	34	66
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	537	8.1	16	124	35	65
<i>Guazuma ulmifolia</i>	573	9.0	27	110	37	63
μ	495	9.0	22	142	32	68
CV	(12)	(6)	(18)	(20)	(12)	(6)

ρ_0 = Densidad básica; CH_{ini} = Contenido de humedad inicial; CHmax = Contenido de humedad máximo experimental; MCH = Máximo contenido de humedad; PSF = Punto de saturación de la fibra; PC = Porcentaje de pared celular; EV = Porcentaje de espacios vacíos; μ = Media; CV = Coeficiente de variación en porcentaje y entre paréntesis.

El contenido de humedad de la madera en su estado saturado medido experimentalmente después de 72 horas de hidratado (fig. 1) indica un valor promedio de 59 % con un coeficiente de variación de 20 % y con un mínimo de 42 % para *S. macrophylla* y un máximo de 81 % para *C. lindleyi* (tabla II). Estos resultados son semejantes a los reportados por Shukla y Kandem ³² para nueve maderas hidratadas durante 48 horas. Sus datos indican un contenido de humedad promedio de 50 % con un coeficiente de variación de 30 % para especies con densidades básicas que van desde 448 kg m⁻³ hasta 950 kg m⁻³. Estos resultados sugieren que el tiempo de hidratado de 72 horas de esta investigación fue suficiente para alcanzar contenidos de humedad en estado saturado superiores a los puntos de saturación de la fibra y suficientes para alcanzar la máxima expansión.

Tabla III. Coeficiente de variación (entre paréntesis) para el contenido de humedad y la densidad básica, sesgo estandarizado, apuntamiento estandarizado y grupos homogéneos de las muestras observadas.

	CV	SE*	AE*	Grupos Homogéneos#			
Especies	(%)	[-2 - +2]	[-2 - +2]				
Contenido de humedad (CH)							
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	(10)	-1.631	0.836	X			
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	(17)	-1.747	1.951	X	X		
<i>Cupressus lindleyi</i>	(7)	1.675	0.644	X	X		
<i>Swietenia macrophylla</i>	(8)	0.193	-0.656	X	X		
<i>Cedrela odorata</i>	(9)	1.995	1.459		X		
<i>Guazuma ulmifolia</i>	(11)	1.110	1.275		X	X	
<i>Fraxinus uhdei</i>	(14)	-1.513	-0.035			X	X
<i>Fagus mexicana</i>	(6)	1.885	0.436				X
Densidad básica (ρ_0)							
<i>Cupressus lindleyi</i>	(7)	-0.449	-0.914	X			
<i>Cedrela odorata</i>	(19)	-0.663	-0.697		X		
<i>Swietenia macrophylla</i>	(7)	-0.156	-1.177		X		
<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	(5)	-0.576	-0.063			X	
<i>Fraxinus uhdei</i>	(6)	-0.007	-1.401			X	
<i>Fagus mexicana</i>	(4)	1.467	-0.683			X	
<i>Dalbergia palo-escrito</i>	(13)	0.384	0.084			X	
<i>Guazuma ulmifolia</i>	(7)	-0.038	-0.728				X
* Se acepta normalidad en la distribución de las muestras para valores del sesgo estandarizado (SE) y del apuntamiento estandarizado (AE) al interior del intervalo [-2, +2]; # No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellas especies que comparten una misma columna de X.							

Densidad básica

Las magnitudes promedio de la densidad básica de la madera para cada una de las especies variaron en el intervalo que va desde 388 kg m^{-3} (*C. lindleyi*) hasta 573 kg m^{-3} (*G. ulmifolia*) (tabla II) y muestran un coeficiente de variación entre especies de 12 %. En comparación con los datos reportados por Torelli y Gorišek^{26, 27} con un rango que va desde un mínimo de 317 kg m^{-3} (*S. parahibum*) hasta un máximo de 1060 kg m^{-3} (*Q. skinneri*) (Anexo), la amplitud del intervalo de valores de la densidad básica de la presente investigación es menor. Sin embargo, el coeficiente de variación de 22 % es solamente 4 % menor al calculado para los datos bibliográficos mencionados, el cual es de 26 %.

Los coeficientes de variación, que representan la variabilidad al interior de cada especie, van desde un mínimo de 4 % (*F. mexicana*) hasta un máximo de 19 % (*C. odorata*). Asimismo, las pruebas de normalidad en las muestras homogéneas de 18 probetas cada una indican distribuciones normales (tabla III). Las pruebas de rangos múltiples indican grupos homogéneos para *C. odorata* y *S. macrophylla* y para *T. donnell-smithii*, *F. uhdei*, *F. mexicana* y *D. palo-escrito*. En este mismo sentido, Sotomayor y Ramírez³³, a partir del análisis de una base de datos de las características higroscópicas de 134 especies mexicanas, así como De Almeida *et al.*³⁴ en su estudio de 15 maderas brasileñas, perciben incompleto el enfoque tradicional de calificar la calidad de una especie o las características de una madera, únicamente en relación con su densidad básica.

Punto de saturación de la fibra

El valor promedio del punto de saturación de la fibra (ecuación 6) de las ocho especies investigadas en esta investigación (tabla II) es 4 % menor que el publicado por Torelli y Gorišek^{26, 27}, el cual es de 26 %. Además, su coeficiente de variación es 8 % menor respecto al calculado para las 43 especies de referencia que es de 26 %. Asimismo, en la presente investigación, la correlación del punto de saturación de la fibra, en función de la densidad básica, indica un coeficiente de determinación bajo, calculado con un estrecho intervalo de densidades básicas para ocho especies. En cambio, el coeficiente de determinación de las maderas referidas de la bibliografía califica como medio para un amplio espectro de densidades básicas de 43 especies (figura 2). Por razones de escala en esta figura y en las siguientes no se visualizan todos los puntos analizados.

Estos resultados coinciden con los de De Almeida *et al.*³⁵ quienes reportan un coeficiente de determinación nulo de 0.09 entre el punto de saturación de la fibra y la densidad básica para 15 maderas brasileñas. No obstante, los resultados de la presente investigación van en sentido diferente a los de Hernández⁸ quien reporta un coeficiente de determinación alto de 0.82, derivado de una regresión lineal con tendencia negativa entre el punto de saturación de la fibra y la densidad básica para nueve especies de Perú.

En relación con estudios de grupos de maderas mexicanas, Bárcenas³⁶ reporta para especies de la Selva Lacandona valores del punto de saturación de la fibra que van desde un mínimo de 20 % (*Astronium graveolens*) hasta un máximo de 33 % (*Schizolobium parahibum*), todo esto para maderas con densidades básicas desde 300 kg m^{-3} (*Schizolobium parahibum*) hasta 860 kg m^{-3} (*Manilkara zapota*). Sus datos correlacionan linealmente con una tendencia negativa $\text{PSF} = -0.0163 \rho_0 + 34.8$

y un bajo coeficiente de 0.33. En el mismo contexto, Fuentes ⁷ utiliza datos de diez especies publicados por Bárcenas ³⁶ y ajusta los valores del punto de saturación de la fibra para calcular una correlación lineal con tendencia negativa $PSF = -0.0265 \rho_0 + 42.4$ con un coeficiente de determinación medio $R^2 = 0.47$. Por su parte, Tamarit y Fuentes ² analizan datos publicados para especies mexicanas por Bárcenas ³⁷ y Fuentes. ⁷ La correlación lineal calculada con sus datos indica una tendencia negativa $PSF = -0.025 \rho_0 + 39.9$ con un coeficiente de determinación medio $R^2 = 0.47$. Sotomayor y Ramírez ³³ publicaron una base de datos de características higroscópicas de la madera que contiene datos del punto de saturación de la fibra de 134 especies. En el mismo contexto, el análisis de correlación lineal de los datos de Sotomayor y Ramírez ³⁸ indican una tendencia negativa $PSF = -0.0253 \rho_0 + 34.5$ con un coeficiente de determinación medio $R^2 = 0.47$ para 12 maderas mexicanas.

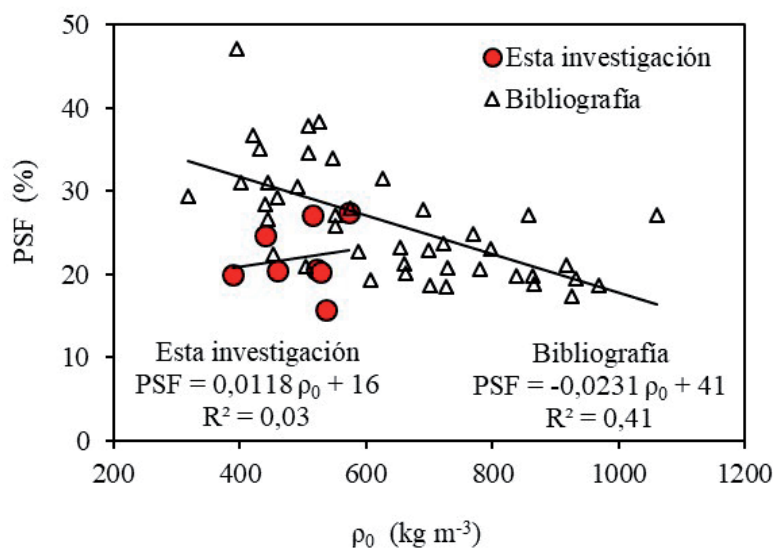


Fig. 2. Correlaciones entre del punto de saturación de la fibra y la densidad básica.

En estudios puntuales de especies mexicanas, Sotomayor y Ramírez ³⁹ publican valores del punto de saturación de la fibra para *Lysiloma spp.* ($\rho_0 = 593 \text{ kg m}^{-3}$) de 25%; por su parte, Sotomayor ⁴⁰ reporta para *Gyrocarpus americanus* ($\rho_0 = 334 \text{ kg m}^{-3}$) un punto de saturación de la fibra de 31 %; y más recientemente, Sotomayor *et al.* ⁴¹ informan del punto de saturación de la fibra para *Enterolobium cyclocarpum* ($\rho_0 = 407 \text{ kg m}^{-3}$) de 23 %, para *C. lindleyi* ($\rho_0 = 438 \text{ kg m}^{-3}$) de 21 % y para *C. odorata* ($\rho_0 = 441 \text{ kg m}^{-3}$) de 24 %, valores para estas dos últimas especies similares a los de esta investigación.

La discrepancia en las magnitudes y tendencias estadísticas de los datos publicados es frecuente en investigación en ciencias de la madera. Resultado que muestra la variabilidad natural de las propiedades higroscópicas entre y al interior de una misma especie, originada por la variedad en su estructura anatómica. ⁴² Sin embargo, las correlaciones indican un decremento del punto de saturación de la fibra a medida que la densidad básica de la madera aumenta, con coeficientes de determinación calificados como medios.

Máximo contenido de humedad

El máximo contenido de humedad varía desde un mínimo de 110 % (*G. ulmifolia*) hasta un máximo de 194 % (*C. lindleyi*) (tabla II). El coeficiente de variación entre especies es similar al del punto de saturación de la fibra de las ocho especies estudiadas. A medida que la densidad básica de la madera aumenta, disminuye su capacidad para contener humedad. Este parámetro está calculado con la ecuación (3) que depende de las mediciones de la relación peso anhidro/volumen saturado y está fundamentado en la propuesta de Tamarit y Fuentes ² acerca de las relaciones teóricas entre la cantidad de materia presente en un volumen de material poroso como lo es la madera. De tal suerte, a medida que aumenta la densidad básica, disminuye la porosidad y el contenido de humedad máximo disminuye. Este argumento se cuantifica con la correlación potencial entre el máximo contenido de humedad y la densidad básica de la madera (figura 3).

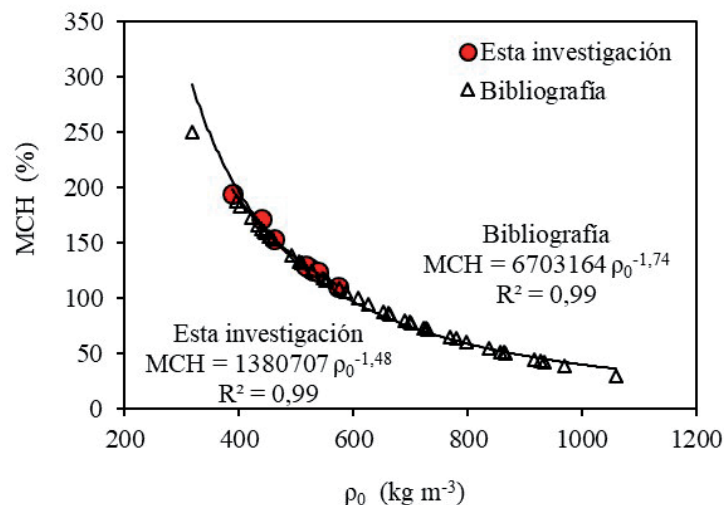


Fig. 3. Correlaciones entre el máximo contenido de humedad y la densidad básica.

En el mismo contexto, la correlación potencial de la presente investigación es similar a la calculada con los datos de Torelli y Gorišek ^{26,27} (figura 3). Además, sigue la misma tendencia estadística de Tamarit y Fuentes ² quienes analizan datos publicados para especies mexicanas por Bárcenas ³⁷ y Fuentes. ⁷ La correlación potencial calculada con estos datos indica una tendencia negativa $MCH = 46252560 \rho_0^{-2.10}$ con un coeficiente de determinación muy alto $R^2 = 0.93$.

Porcentaje de pared celular y espacios vacíos

Las magnitudes promedio del porcentaje de pared celular (ecuación 4) variaron en el intervalo que va desde un mínimo de 25 % (*C. lindleyi*) hasta un máximo de 37 % (*G. ulmifolia*). Como complemento al 100 % de un volumen elemental de materia, el porcentaje de espacios vacíos (ecuación 5) es inversamente proporcional al valor del porcentaje de pared celular (tabla II). Esto es también cierto para los valores promedio de las ocho especies. Sin embargo, el coeficiente de variación del porcentaje de pared celular es el doble respecto al del porcentaje de espacios vacíos. El porcentaje de espacios vacíos es equivalente a la porosidad. ³²

Así, se confirma que la madera absorbe más humedad a medida que es más porosa para las maderas *C. lindleyi*, *C. odorata* y *S. macrophylla*,² pero no para las otras cinco especies.

Las correlaciones lineales entre los porcentos de pared celular y de espacios vacíos en función de la densidad básica, calculados con las ecuaciones (4) y (5), así como los derivados del análisis de Torelli y Gorišek²⁷ y Tamarit y Fuentes² resultan en modelos similares y con coeficientes de determinación muy altos (figuras 4 y 5). Para el caso del por ciento de pared celular, este aumenta a medida que la densidad básica incrementa (figura 4). Lo opuesto se observa para el por ciento de espacios vacíos (figura 5).

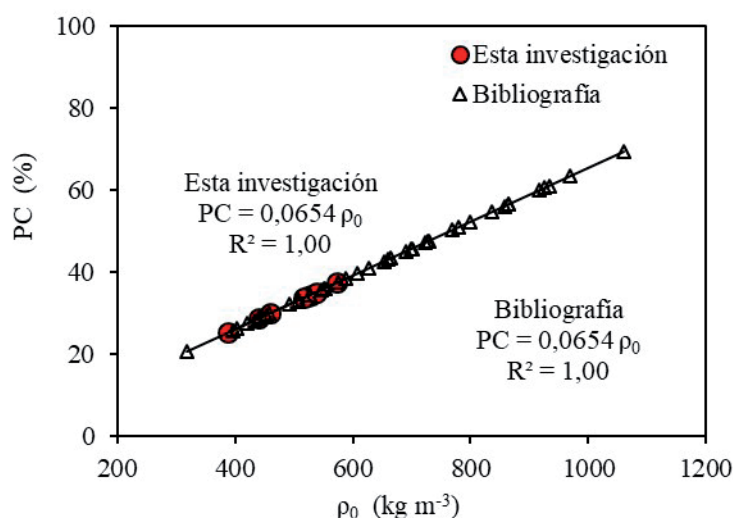


Fig. 4. Correlaciones entre por ciento de pared celular y densidad básica.

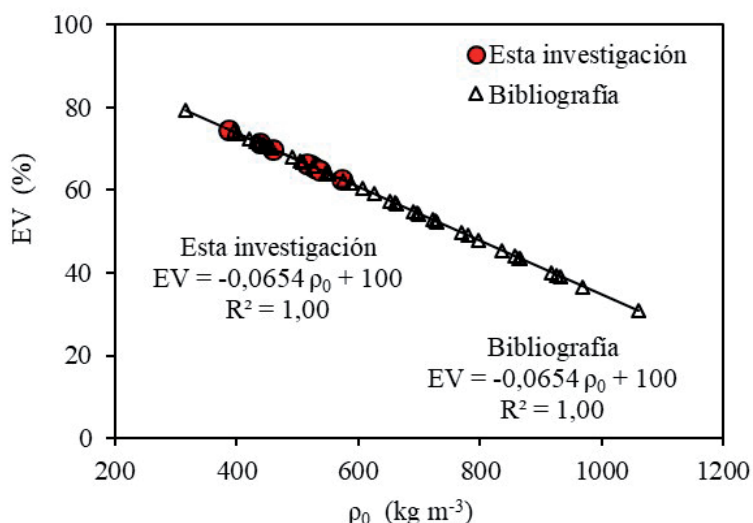


Fig. 5. Correlaciones entre por ciento de espacio vacío y densidad básica.

A mayor magnitud de los espacios vacíos (EV), mayor será la porosidad del material. En consecuencia, es mayor la velocidad de hidratado y menor la dificultad para aplicar tratamientos de secado y de impregnación con sustancias de protección. El volumen de espacio vacío interno por unidad de volumen externo que caracteriza a cada especie de madera, predice el volumen máximo de solución preservante que es capaz de absorber. Conociendo esto, se puede variar la concentración de la solución preservante para que se logren los niveles de retención óptimos, siguiendo a Tamarit y Fuentes.²

CONCLUSIONES

La magnitud de las características higroscópicas de las maderas *Cupressus lindleyi*, *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia donnell-smithii*, *Fraxinus uhdei*, *Fagus mexicana*, *Dalbergia palo-escrito* y *Guazuma ulmifolia* es similar a las de otras especies mexicanas reportadas en la literatura.

Los modelos estadísticos permiten predecir el máximo contenido de humedad, el porcentaje de pared celular y el porcentaje de espacios vacíos en función de la densidad básica de la madera.

La estrategia experimental se orientó hacia el análisis de resultados especie por especie. De acuerdo con el paradigma contemporáneo en ciencias de la madera, es necesario caracterizar el comportamiento mecánico de la madera con un enfoque de experimentación de caso por caso de una especie en particular. Cada procedimiento debe estar referido a las variables de referencia de las condiciones de ensayo, por ejemplo, la densidad y el contenido de humedad de la madera, y con datos derivados de un tamaño de muestra observada estadísticamente representativa. Una vez teniendo observaciones integrantes y estadísticamente representativas, se pueden proponer tendencias en el comportamiento general para una especie en específico, y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar.

REFERENCIAS

1. Abdelmohsen, S., Adriaenssens, S., El-Dabaa, R., Gabriele, S., Olivieri, L., & Teresi, L. (2019). A multi-physics approach for modeling hygroscopic behavior in wood low-tech architectural adaptive systems. *Computer-Aided Design*, 106, 43-53.
2. Tamarit Urias, J. C., & Fuentes Salinas, M. (2003). Parámetros de humedad de 63 maderas latifoliadas mexicanas en función de su densidad básica. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(2), 155-164.
3. Berry, S. L., & Roderick, M. L. (2005). Plant-water relations and the fibre saturation point. *New Phytologist*, 168, 25-37.
4. De Almeida, G., Huber, F., Perré, P. (2014). Free shrinkage of wood determined at the cellular level using an environmental scanning electron microscope. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(2), 187-198.
5. Hamid, N. H. A., Ahmad, M., & Suratman, M. N. (2011). Swelling and Shrinkage Characteristics of Kapur (*Dryobalanops aromatica*) Wood in Three Anatomical Directions. 2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications (ISBEIA). Langkawi, Malaysia: IEEE. pp. 98-101.

6. Ajuziogu, G. C., Amujiri, A. N., Njoku, E. U., Ozokolie, C. B., & Ojua, E. O. (2020). Determination of Swelling and Dimensional Stability of Some Nigerian Timber Species. *Annual Research & Review in Biology*, 35(1), 24-29.
7. Fuentes Salinas, M. (2000). Estimación del Punto de Saturación de la Fibra (PSF) de las maderas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 6(1), 79-81.
8. Hernández, R. E. (2007b). Effects of extraneous substances, wood density and interlocked grain on fiber saturation point of hardwoods. *Wood Material Science and Engineering*, 2(1), 45-53.
9. Herrera-Builes, J. F., Ananías, R. A., & Osorio, J. A. (2020). Incidencia de la impregnación de madera con alcohol polivinílico y polietilenglicol en algunas propiedades físicas y mecánicas de pino oocarpa. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22(2), 213- 222.
10. Liu, M., Xu, G., Wang, J., Wu, Z., Lv, J., & Xu, W. (2020). Effects of Shellac Treatment on Wood Hygroscopicity, Dimensional Stability and Thermostability. *Coatings*, 10, 881.
11. Németh, R., Horváth, N., Fodor, F., Báder, M., & Bak, M. (2020). Wood Modification for Under-Utilized Hardwood Species. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 505, 012017.
12. Schneid, E., Gonzalez de Cademartori, P. E., & Gatto, D. (2014). The effect of thermal treatment on physical and mechanical properties of *Luehea divaricata* hardwood. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(4), 413-422.
13. Schorr, D., & Blanchet, P. (2020). Improvement of White Spruce Wood Dimensional Stability by Organosilanes Sol-Gel Impregnation and Heat Treatment. *Materials*, 13(4), 973-987.
14. Fang, C. H., Cloutier, A., Blanchet, P., Koubaa, A., & Mariotti, N. (2011). Densification of wood veneers combined with oil-heat treatment. Part I: dimensional stability. *BioResources*, 6(1), 373-385.
15. Laine, K., Belt, T., Rautkari, L., Ramsay, J., Hill, C. A. S., & Hughes, M. (2013). Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified Scots pine solid wood. *Journal of Materials Science*, 48, 8530-8538.
16. El-Dabaa, R., & Abdelmoshen, S. (2019). HMTM: Hygromorphic-Thermobimetal Composites as a Novel Approach to Enhance Passive Actuation of Adaptive Façades. 18th International Conference, CAAD Futures 2019, Proceedings. Daejeon, Korea: Springer. pp. 567- 577.
17. Englund, E. T., Thygesen, L. G., Svensson, S., & Hill, C. A. S. (2013). A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Science and Technology*, 47(1), 141-161.
18. Ávila, L. E., & Herrera, M. A. (2012). Efecto de los extraíbles en tres propiedades físicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum* procedente de Michoacán, México. *Bosque*, 33(2), 227-232.
19. Nakano, T. (2003). Effects of Cell Structure on Water Sorption for Wood. *Holzforschung*, 57, 213-218.

20. Ištók, I., Sedlar, T., Šefc, B., Sinkovi, T., & Perkovi, T. (2016). Physical Properties of Wood in Poplar Clones 'I-214' and 'S1-8'. *Drvna Industrija*, 67(2), 163-170.
21. Hernández, R. E. (2007a). Swelling properties of hardwoods as affected by their extraneous substances, wood density, and interlocked grain. *Wood and Fiber Science*, 39(1), 146-158.
22. Sahin, H. T. (2010). Experimental determination of the anisotropic swelling and water sorption properties of chestnut wood. *Wood Research*, 55(1), 33-40.
23. Tamarit Urias, J. C. & López Torres, J. L. (2007). *Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México*. Puebla: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
24. Silva Guzmán, J. A., Fuentes Talavera, F. J., Rodríguez Anda R., Torres Andrade, P. A., Lomelí Ramírez, M. A., Ramos Quirarte, J., Waitkus, C., & Richter, H. G. (2010). Fichas de propiedades tecnológicas y usos de maderas nativas de México e importadas. México: Comisión Nacional Forestal.
25. Bárcenas Pazos, G. M. (2020). Banco de información sobre características tecnológicas de maderas mexicanas. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO). México: Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad.
26. Torelli, N., & Gorišek, Ž. (1995a). Mexican tropical hardwoods. Dimensional stability. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 53, 277-280.
27. Torelli, N., & Gorišek, Ž. (1995b). Mexican tropical hardwoods. Stepwise shrinkage and transverse shrinkage anisotropy. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 53, 155-157.
28. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1982). Estudio promocional de 43 especies forestales tropicales mexicanas. Programa de Cooperación Científica y Técnica, México-Yugoslavia: SARH. SFF.
29. Chiniforush, A. A., Akbarnezhad, A., Valipour, H., & Malekmohammadi, S. (2019). Moisture and temperature induced swelling/shrinkage of softwood and hardwood glulam and LVL: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 207, 70-83.
30. Koman, S., & Feher, S. (2015). Basic density of hardwoods depending on age and site. *Wood Research*, 60(6), 907-912.
31. Tippner, J., Hrivnák, J. & Kloiber, M. (2016). Experimental Evaluation of Mechanical Properties of Softwood using Acoustic Methods. *BioResources*, 11(1), 503-518.
32. Shukla, S. R., & Kandem, D. P. (2010). Dimensional stability of nine tropical hardwoods from Cameroon. *Journal of Tropical Forest Science*. 22(4), 389-396.
33. Sotomayor Castellanos, J. R., & Ramírez Pérez, M. (2013). Densidad y características higroscópicas de maderas mexicanas. Base de datos y criterios de clasificación. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 9(3), 3-29.
34. De Almeida, T., De Almeida, D. H., De Araujo, V. A., Da Silva, S. A. M., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2017). Density as Estimator of Dimensional Stability Quantities of Brazilian Tropical Woods. *BioResources*, 12(3), 6579-6590.

35. De Almeida, T. H., De Almeida, D. H., Aquino, V. B. M., Chahud, E., Pinheiro, R. V., Branco, L. A. M. N., De Almeida, J. P. B., Christoforo, A. L. & Lahr, F. A. R. (2020). Investigation of the Fiber Saturation Point of Tropical Brazilian Wood Species. *BioResources*, 15(3), 5379-5387.
36. Bárcenas Pazos, G. M. (1995). Caracterización tecnológica de veinte especies maderables de la Selva Lacandona. *Madera y Bosques*, 1(1), 9-38.
37. Bárcenas Pazos, G. M. (1985). Recomendaciones del uso de 80 especies de acuerdo con su estabilidad dimensional. Nota Técnica no.11. Xalapa: LACITEMA-INIREB.
38. Sotomayor Castellanos, J. R., & Ramírez Pérez, M. (2014a). Características físicas de 12 maderas mexicanas. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 10(1), 4-35.
39. Sotomayor Castellanos, J. R., & Ramírez Pérez, M. (2014b). Caracterización físico-mecánica e indicadores de calidad de la madera de *Lysiloma* spp. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 10(3), 4-65.
40. Sotomayor Castellanos, J. R. (2017). Densificado higro-termo-mecánico de madera de *Gyrocarpus americanus*. Pruebas de higroscopía. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 13(2), 4-21.
41. Sotomayor Castellanos, J. R., Tinoco Campos, L. M., & Raya González, D. (2020). Características higroscópicas de la madera de *Enterolobium cyclocarpum*, *Cupressus lindleyi* y *Cedrela odorata*. *Ciencia Nicolaita*, 79(1), 75-93.
42. Sargent, R. (2019). Evaluating dimensional stability in solid wood: a review of current practice. *Journal of Wood Science*, 65, 36-47.

ANEXO

Densidad básica, máximo contenido de humedad, porcentaje de pared celular, porcentaje de espacios vacíos y punto de saturación de la fibra de 43 especies mexicanas adaptados de Torelli y Gorišek.^{26, 27} (de *Alchornea latifolia* a *Dialium guianense*).

		Características higroscópicas			
	ρ_0	MCH	PC	EV	PSF
Especies	(kg m ⁻³)	(%)			
<i>Alchornea latifolia</i>	402	183	26	74	31
<i>Ampelocera hottlei</i>	690	80	45	55	28
<i>Aspidosperma megalocarpun</i>	798	60	52	48	23
<i>Blepharidium mexicanum</i>	626	94	41	59	31
<i>Brosimum allicastrum</i>	865	50	57	43	19
<i>Bursera simaruba</i>	452	156	30	70	22
<i>Calophyllum brasiliense</i>	575	109	38	62	28
<i>Cordia alliodora</i>	552	116	36	64	27
<i>Cymbopetalum penduliflorum</i>	395	188	26	74	47
<i>Dendropanax arboreus</i>	421	172	28	72	37
<i>Dialium guianense</i>	917	44	60	40	21

ANEXO (CONTINUACIÓN)

Densidad básica, máximo contenido de humedad, porcentaje de pared celular, porcentaje de espacios vacíos y punto de saturación de la fibra de 43 especies mexicanas adaptados de Torelli y Gorišek.^{26,27} (de *Dipholis stevensonii* a *Zuelania guidonia*).

	ρ_0	Características higroscópicas			
		MCH	PC	EV	PSF
Especies	(kg m ⁻³)	(%)			
<i>Dipholis stevensonii</i>	969	38	63	37	19
<i>Guarea glabra</i>	587	105	38	62	23
<i>Guatteria anomala</i>	432	166	28	72	35
<i>Lonchocarpus castilloi</i>	837	54	55	45	20
<i>Lonchocarpus hondurensis</i>	729	72	48	52	21
<i>Manilkara zapota</i>	926	43	61	39	17
<i>Misanteca pekii</i>	653	88	43	57	23
<i>Nectandra sp.</i>	508	131	33	67	35
<i>Pachica acuática</i>	526	125	34	66	38
<i>Pithecellobium arboreum</i>	700	77	46	54	19
<i>Pithecellobium leucocalix</i>	505	133	33	67	21
<i>Platymiscium yucatanum</i>	727	72	48	52	18
<i>Poulsenia armata</i>	445	159	29	71	31
<i>Pseudobombax ellipticum</i>	444	160	29	71	27
<i>Pseudolmedia oxyphyllaria</i>	723	73	47	53	24
<i>Pterocarpus hayesii</i>	508	131	33	67	38
<i>Quercus anglohondurensis</i>	857	51	56	44	27
<i>Quercus skinneri</i>	1060	29	69	31	27
<i>Schizolobium parahibum</i>	317	250	21	79	29
<i>Sebastiana longicuspis</i>	607	99	40	60	19
<i>Sickingia salvadorensis</i>	769	65	50	50	25
<i>Simarouba glauca</i>	439	162	29	71	28
<i>Spondias mombin</i>	491	138	32	68	31
<i>Swartzia cubensis</i>	933	42	61	39	20
<i>Sweetia panamensis</i>	864	50	56	44	20
<i>Swietenia macrophylla</i>	458	153	30	70	29
<i>Talauma mexicana</i>	551	116	36	64	26
<i>Terminalia amazonia</i>	663	85	43	57	20
<i>Vatairea lundelli</i>	780	63	51	49	21
<i>Vitex gaumeri</i>	660	86	43	57	21
<i>Vochysia hondurensis</i>	547	117	36	64	34
<i>Zuelania guidonia</i>	698	78	46	54	23

ρ_0 = Densidad básica; CH = Contenido de humedad inicial; MCH = Máximo contenido de humedad; PC = Porcentaje de pared celular; EV = Porcentaje de espacios vacíos; PSF = Punto de saturación de la fibra.

Colaboradores

Cedillo Garza, Guadalupe E.

Ingeniero Mecánico y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica por la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL, además de Licenciado en Matemáticas por la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas. Maestro Decano de FIME, Director de la misma de 1984 a 1990. Fundador de Programa de Doctorado (1986), miembro de la Junta de Gobierno de 1999 a 2010.

De la O Serna, José Antonio

Doctor en Telecomunicaciones por la Escuela TELECOM Paris Tech, Francia (1982). Entre 1982 y 1986 trabajó en el ITESM. De 1988 a 1993 trabajó en el Politécnico de Yaoundé, Camerún. Actualmente es Profesor Investigador de la UANL en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CIDET). Es miembro del SNI.

Loya Cabrera, Alejandro E.

Ingeniero en control y Computación por la Universidad Autónoma de Nuevo León y Maestro en Ciencias de la Ingeniería con especialidad en Telecomunicaciones en 1996 y 2006. De 2002 a 2009 responsable de planeación estratégica en la FIME UANL, actualmente miembro del cuerpo académico en Automatización y Control, y jefe del departamento académico de Electrónica y Automatización en la FIME UANL.

Macedo Alquicira, Israel

Licenciatura en Arquitectura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Actualmente alumno del Doctorado en Ciencias de

la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Martin Bruce

Ha estado trabajando en la recopilación y análisis de datos acústicos desde 1991. De 1991 a 2007, se involucró en el desarrollo de sonares combinados activos-pasivos. En 2007 él cambió a acústica ambiental y paisajes sonoros. Ha trabajado en numerosos proyectos, incluyendo el proyecto de monitoreo acústico del Mar Chukchi (2007-2014), proyectos de monitoreo acústico de Tappan Zee (2010-2014), y un programa de monitoreo de área amplia en la Costa Este de Canadá (2015-2018). Bruce está realizando un doctorado en la Universidad Dalhousie de Halifax, Canadá, donde su interés de investigación está en la ecología del paisaje sonoro, especialmente técnicas automatizadas para cuantificar fuentes en el paisaje sonoro.

Mendoza González, Ernesto

Licenciatura en Arquitectura, Universidad Mexiquense del Bicentenario Jilotepec, Estado de México. Experiencia profesional en arquitectura y urbanismo, y en procesos de manufactura automotriz y farmacéutica. Actualmente alumno de la Maestría en Ciencias y Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Miksis-Olds Jennifer L.

Es profesora investigadora y directora asociada de investigación en la Escuela de Ciencias Marinas e Ingeniería Oceánica de la Universidad de New Hampshire, Durham. Su investigación emplea métodos acústicos para responder a preguntas biológicas en el medio ambiente marino. Sus

principales intereses incluyen patrones y tendencias en el sonido oceánico, comportamiento animal y comunicación, y el efecto de la actividad antropogénica, vínculos con los animales y su entorno. Los aspectos de la acuática, la biología, la oceanografía y la ingeniería se combinan para crear el enfoque interdisciplinario necesario para extender el estudio remoto del océano y de los animales en su entorno natural más allá de donde está hoy.

Sotomayor Castellanos, Javier Ramón

Licenciatura en Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México. Maestría en Ciencias de la Madera, Universidad Laval, Canadá. Doctorado en Ciencias de la Madera, Universidad Laval, Canadá. Actualmente profesor en la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

Platas Garza, Miguel A.

Doctor en ingeniería eléctrica por la Universidad Autónoma de Nuevo León en 2011. Actualmente es profesor titular en la misma institución. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores con la distinción de Nivel 1. Sus intereses académicos se encuentran relacionados a procesamiento de señales.

Posadas-Castillo, Cornelio

Ingeniero en Control y Computación (1997) por la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones por el CICESE, en 2001; obtuvo su Doctorado en Eléctrica de la Universidad Autónoma de Baja California en 2008. Desde 1997 es

Profesor de Tiempo Completo en la FIME-UANL. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde 2009.

Tyack Peter L.

Es profesor de biología marina de mamíferos en la Universidad de St Andrews, Escocia. Su investigación se centra sobre ecología del comportamiento ecológico, comunicación acústica, y comportamiento social de mamíferos marinos. Ha estudiado el llamado reproductivo de ballenas barbadas, individualmente, llamadas de contacto distintivas y ecolocalización de ballenas dentadas en la profundidad. Ha desarrollado nuevos métodos para muestrear continuamente el comportamiento de los mamíferos marinos, incluyendo el desarrollo de la grabación de sonido y etiquetas de orientación. Ha desarrollado una serie de estudios sobre respuestas a los sonidos antropogénicos, incluidos los efectos de la exploración petrolera sobre las ballenas barbadas y cachalotes y los efectos del sonar naval sobre las ballenas dentadas.

Zambrano-Serrano, Ernesto

Licenciado en Ciencias de la Electrónica y Maestro en Ciencias de la Electrónica con opción en Automatización por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, en 2009 y 2012 respectivamente. Doctor en Control y Sistemas Dinámicos por el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, en 2017. En 2018 realizó una estancia posdoctoral en la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la BUAP. Actualmente realiza una estancia posdoctoral en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la UANL. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

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.

Ingenierías

ISSN 1405-0676

91

