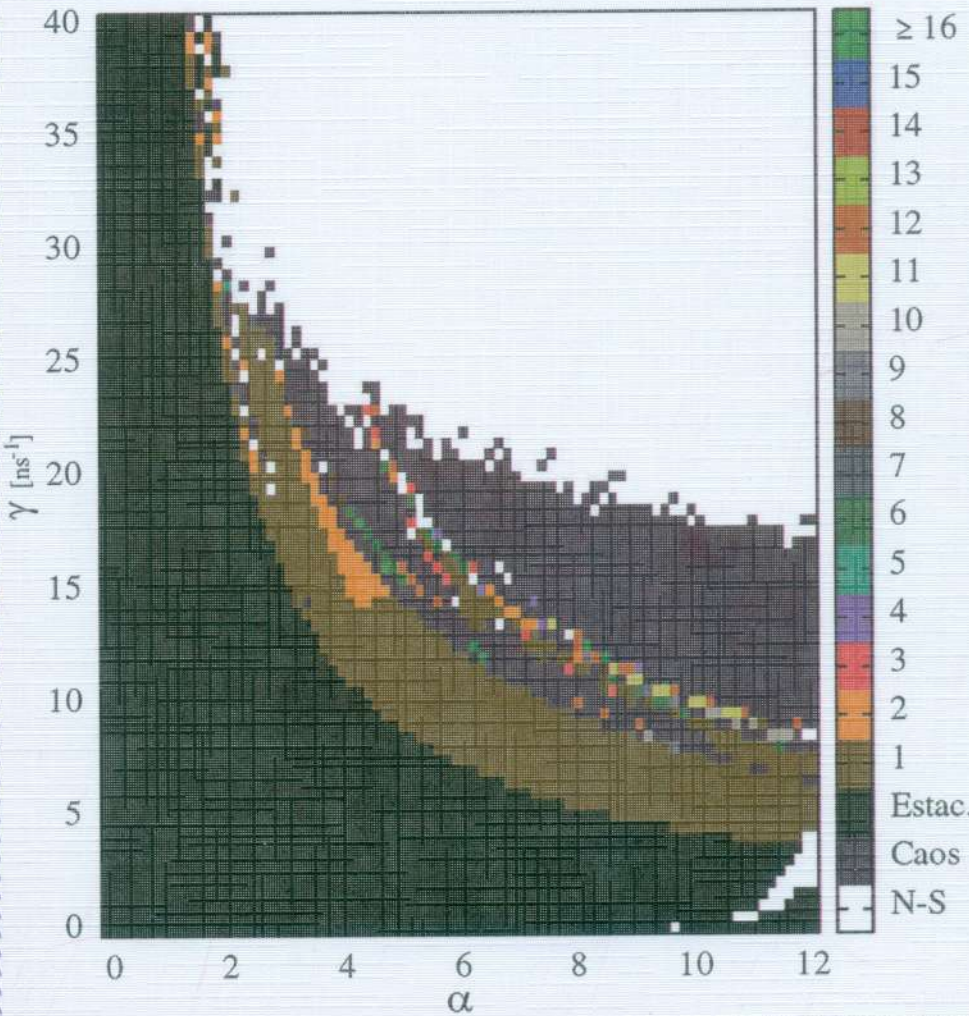


ISSN - 1562 - 3823

REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

NÚMERO 43

DICIEMBRE 2023 - LA PAZ - BOLIVIA



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS
CARRERA DE FÍSICA - UMSA

SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA

REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

Esta es una revista de la Unión Iberoamericana de Sociedades de Física

COMITÉ EDITORIAL

Sociedad Boliviana de Física

Lic. Alfonso Velarde Chávez
Email: alfonso.velarde@gmail.com

Instituto de Investigaciones Físicas

Dr. Flavio Ghezzi Moris
Email: fghezzi@fiumsa.edu.bo
Dr. Wilfredo Tavera Llanos
Email: witavera@fiumsa.edu.bo

Carrera de Física

Dr. Armando R. Ticona Bustillos
Email: aticona@fiumsa.edu.bo

Casilla 8635, La Paz – Bolivia. Tel.: (591-2) 2792999, Fax: (591-2) 2792622

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Oscar Antonio Rondón

Institute of Nuclear and Particle Physics
University of Virginia
McCormick Road, Charlottesville, VA 22901
804 924-6787, USA
Email: or@virginia.edu

Dr. Carlos Navia

Instituto de Física
Universidade Federal Fluminense
Av. Gen. Milton Tavares de Souza
24210-340, Niterói, RJ-Brasil
Email: gfcnoj@if.uff.br

Dr. Marcus Werner Beims

Departamento de Física
Universidade Federal do Paraná
81531-990, Curitiba, Paraná, Brasil
Email: mbeims@fisica.ufpr.br

Dr. Emil de Souza Sánchez Filho

TEC – Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal Fluminense
24210-020, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
Email: emilsanchez@uol.com.br

Dr. Marcos Flores Carrasco

Departamento de Física
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile
Av. Blanco Encalada 2008, Santiago, Chile
Email: mflorescarra@uchile.cl

ISSN 1562-3823



Revista Boliviana de Física

PUBLICACIÓN DE
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FÍSICAS
CARRERA DE FÍSICA
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
Y
SOCIEDAD BOLIVIANA DE FÍSICA

NÚMERO 43
DICIEMBRE DE 2023

Revista Boliviana de Física

ISSN 1562-3823

Indexada en: SciELO, Latindex, Periódica

<http://www.scielo.org.bo>

<http://www.latindex.unam.mx>

Publicación del Instituto de Investigaciones Físicas, la Carrera de Física de la Universidad Mayor de San Andrés y de la Sociedad Boliviana de Física.
Casilla 8635, La Paz, Bolivia.

Diseño: W. Tavera

Dirección: Carrera de Física, Campus Universitario, Calle 27, Cota Cota, La Paz.

Tel: (591 2) 2792999; FAX: (591 2) 2792622.

Portada: Caracterización de la sincronización mediante periodicidades de dos láseres acoplados unidireccionalmente.

Formato $\LaTeX 2_{\epsilon}$. *Tipo de fuente utilizada:* newcentury

Impreso por: **Imprenta Antofagasta**

Dirección: Canónigo Ayllón No. 524. Tel. (591 2) 2493609.

CONTENIDO

EDITORIAL	<i>Editor</i>	1
-----------	---------------	---

A. ARTÍCULOS

USO DE PERIODICIDADES EN LA DESCRIPCIÓN DE LA DINÁMICA Y SINCRONIZACIÓN EN UN SISTEMA TRANSMISOR RECEPTOR DE LÁSERES	<i>D. Polo-Alcoba & G. M. Ramírez-Ávila</i>	3
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD ELÉCTRICA POR UNIDAD DE LONGITUD CON FINES DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	<i>R. Suntura</i>	11
EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN UTILIZANDO EL EQUIPO EYECON DE ULTRASONIDO, MEDIANTE TÉCNICAS COMPUTACIONALES PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE LA IMAGEN SAFT	<i>Elba J. Colque-Zacarias & E. Palenque V.</i>	18

EDITORIAL

La investigación científica en los países latinoamericanos se desarrolla principalmente con fondos públicos, los cuales, la mayoría de las veces, son insuficientes. Las universidades públicas se constituyen en actores principales para el desarrollo de la ciencia, tecnología e innovación (CTI), con una marcada asimetría entre los países donde ha sido posible establecer sistemas nacionales de CTI sólidos y aquellos donde no se cuenta con estos. La investigación científica debe cumplir su objetivo primario de generar conocimiento nuevo para avanzar en una determinada área, pero también debe estar orientada a resolver problemas que todavía están presentes en nuestra sociedad, como la pobreza y el acceso desigual a las nuevas tecnologías y a los servicios de calidad. Se plantean también nuevos desafíos con la atención de problemas locales y regionales que surgen en el contexto de un escenario global, como son los cambios climáticos, la seguridad alimentaria, las nuevas enfermedades y la crisis medioambiental, entre otros.

En este contexto, reiteramos que es importante promover la más amplia difusión de los resultados de la investigación científica que se genera en el ámbito académico latinoamericano y mundial, en una modalidad colaborativa de acceso abierto. La Revista Boliviana de Física, ratifica su compromiso de servicio a toda la comunidad científica, con la aspiración de que este medio de comunicación, coadyuve de alguna manera al crecimiento de la ciencia en nuestra región.

En esta oportunidad, ponemos a consideración de nuestros amables lectores, la Revista Boliviana de Física número 43, con tres muy interesantes artículos.

En el artículo titulado “Uso de periodicidades en la descripción de la dinámica y sincronización de un sistema transmisor receptor de Láseres”, los autores Polo-Alcoba & Ramírez-Ávila (2023), presentan un interesante estudio del comportamiento dinámico de dos láseres acoplados en la configuración transmisor-receptor. En el estudio se incluyen aspectos relacionados con el ruido y el retardo que permiten aproximarse a las condiciones experimentales. Se obtienen también conclusiones importantes respecto de la sincronización en este sistema.

El artículo de Suntura (2023), cuyo título es: “Cálculo de la capacidad eléctrica por unidad de longitud con fines de ensayos no destructivos”, se realizan simulaciones numéricas aplicadas a columnas de concreto para el cálculo de la capacidad eléctrica en función de la distribución y forma de los conductores, que puede ser utilizada como una nueva técnica de ensayos no destructivos. Según indica el autor, las tablas y gráficos de capacidad por unidad de longitud obtenidos mediante esta técnica, proporcionarían un método para inferir algunas características de las columnas de concreto.

En el artículo “Evaluación de estructuras de hormigón utilizando el equipo EYECON de ultrasonido, mediante técnicas computacionales para la reconstrucción de la imagen SAFT”, Colque-Zacariás & Palenque (2023), describen el uso de la técnica de ultrasonido para determinar defectos internos en una muestra de hormigón fabricada en condiciones controladas e introducen un nuevo algoritmo para determinar con mayor detalle anomalías y huecos de la muestra.

Reiteramos nuestra invitación para que considere la publicación de su próximo artículo en la Revista Boliviana de Física.

REFERENCIAS

- Colque-Zacariás, E. J. & Palenque, E. 2023, Revista Boliviana de Física, 43, 18
- Polo-Alcoba, D. & Ramírez-Ávila, M. G. 2023, Revista Boliviana de Física, 43, 3
- Suntura, R. 2023, Revista Boliviana de Física, 43, 11

EDITORIAL

Scientific research in Latin American countries is developed mainly with public funds, which, most of the time, are insufficient. Public universities are the main actors in the development of science, technology and innovation (STI), with a marked disparity between countries where it has been possible to establish solid national STI systems and those where they do not exist. While scientific research must fulfil its primary objective of generating new knowledge to advance in a given area, it must also be oriented toward solving problems that are still present in society, such as poverty and unequal access to new technologies and quality services. There are also new challenges from addressing local and regional problems that emerge in the context of a global scenario, such as climate change, food security, new diseases and the environmental crisis, among others. In this context, we reiterate that it is important to promote the widest dissemination of scientific research results generated in the Latin American and worldwide academic community, with a collaborative and open access approach. The Bolivian Journal of Physics ratifies its commitment to serve the entire scientific community, with the aspiration that this medium of communication, contributes in some way to the growth of science in our region.

In this opportunity, we offer our esteemed readers the Bolivian Journal of Physics number 43, with three very interesting articles. In the article entitled "Use of periodicities in the description of the dynamics and synchronization in a laser transmitter-receiver system", the authors Polo-Alcoba & Ramírez-Ávila (2023), present an insightful study of the dynamic behavior of two lasers coupled in the transmitter-receiver configuration. The study includes features related to noise and delay that allow us to approximate experimental conditions. Important conclusions regarding synchronization in this system are also obtained.

The article by Suntura (2023), whose title is: "Calculation of electrical capacity per unit length for non-destructive testing", performs numerical simulations applied to concrete columns for the calculation of electrical capacity as a function of the distribution and shape of the conductors, which can be used as a new technique for non-destructive testing. According to the author, the tables and graphs of capacity per unit length obtained by this technique can provide a method to infer certain characteristics of concrete columns.

In the article "Evaluation of concrete structures using EYECON ultrasound equipment by means of computational techniques for SAFT image reconstruction", Colque-Zacariás & Palenque (2023), describe the use of the ultrasound technique to determine internal defects in a concrete sample manufactured under controlled conditions and provide a new algorithm to determine in greater detail anomalies and voids in the sample.

We extend our invitation for you to consider the publication of your next article in the *Revista Boliviana de Física*.

REFERENCIAS

- Colque-Zacariás, E. J. & Palenque, E. 2023, *Revista Boliviana de Física*, 43, 18
- Polo-Alcoba, D. & Ramírez-Ávila, M. G. 2023, *Revista Boliviana de Física*, 43, 3
- Suntura, R. 2023, *Revista Boliviana de Física*, 43, 11

USO DE PERIODICIDADES EN LA DESCRIPCIÓN DE LA DINÁMICA Y SINCRONIZACIÓN EN UN SISTEMA TRANSMISOR RECEPTOR DE LÁSERES
USE OF PERIODICITIES IN THE DESCRIPTION OF THE DYNAMICS AND SYNCHRONIZATION IN A LASER TRANSMITTER-RECEIVER SYSTEM

DANIEL POLO-ALCOBA^{1,a†} & GONZALO MARCELO RAMÍREZ-ÁVILA^{2,3,4,b‡}

¹ Carrera de Física, Universidad Mayor de San Andrés. Campus Universitario, c. 27 s/n Cota-Cota, Casilla 8635. La Paz-Bolivia.

² Namur Institute for Complex Systems (naXys), Université de Namur, Rue de Bruxelles 61, B-5000 Namur, Belgium.

³ Instituto de Investigaciones Físicas, Universidad Mayor de San Andrés. Campus Universitario, c. 27 s/n Cota-Cota, Casilla de Correos 8635. La Paz-Bolivia. &

⁴ Planetario Max Schreier, Universidad Mayor de San Andrés. Campus Universitario, c. Federico Zuazo 1976. La Paz-Bolivia.

(Recibido 31 de julio de 2023; aceptado 2 de diciembre de 2023)

<https://doi.org/10.53287/qpea8929bo19y>

RESUMEN

En este trabajo, presentamos los resultados de la integración numérica de un modelo matemático que describe la dinámica de dos láseres acoplados unidireccionalmente. La investigación se centró en la caracterización de la dinámica del sistema, con un enfoque en la búsqueda de regiones de sincronización en relación a términos como el ruido, el retardo, y los parámetros de control asociados a la intensificación del ancho de línea y la retroalimentación. La dinámica del sistema se caracterizó mediante la obtención de diagramas de bifurcación y de planos de parámetros basados el cálculo de periodicidades. Las regiones de sincronización se identificaron utilizando dos indicadores, y se estableció una metodología para la descripción e interpretación de estas zonas de sincronización.

Palabras clave: Sincronización caótica – Láseres acoplados – Dinámica no Lineal.

ABSTRACT

We present the results of the numerical integration of a mathematical model describing the dynamics of two unidirectional coupled lasers. The investigation centered on the characterization of the system dynamics, with a focus on the search for synchronization regions. In which, we take into account related terms such as noise, delay as well as the control parameters associated with line width enhancement and feedback. Bifurcation diagrams and periodicity-based parameter planes are essential to characterize the system's dynamic behavior. Finally, synchronization regions were identified using two indicators, and a protocol was proposed to describe and interpret the system's dynamic behavior associated with these synchronization regions.

Subject headings: Chaotic synchronization – Coupled lasers – Nonlinear Dynamics.

1. INTRODUCCIÓN

En la última década del siglo XIX, Henri Poincaré, al estudiar el problema de los tres cuerpos, descubrió la existencia de órbitas que no son periódicas, están acotadas, y no tienden a un punto fijo; este hecho dio lugar al surgimiento de lo que hoy conocemos como dinámica no lineal. Posteriormente, este comportamiento sería denominado como caótico, el cual es un tipo específico de evolución irregular producido por un sistema determinista. Kaplan & Glass (1995) definen el comportamiento caótico con las siguientes

características principales: dinámica acotada, es decir, que no tiende al infinito; determinismo, que implica una dinámica del sistema bien definida; sensibilidad a las condiciones iniciales, lo que significa que las trayectorias de dos puntos inicialmente cercanos, se alejan exponencialmente a medida que transcurre el tiempo; y aperiodicidad, situación que describe la no repetibilidad de un mismo punto en el espacio de fases.

En el estudio de la dinámica de sistemas caóticos existen varias herramientas para caracterizar su comportamiento. Nicolis (1995) detalla la caracterización a través de diagramas de bifurcación; Por otro lado, Ramírez-Ávila & Gallas (2011) proponen una caracterización basada en las periodicidades del sistema; y Strogatz (2018) hace referencia al estudio de

^a<https://orcid.org/0009-0000-7858-1093>

^b<https://orcid.org/0000-0003-4522-9012>

[†]Email: dpoloe@fcpn.edu.bo

[‡]Email: mravila@fiumsa.edu.bo

la dinámica de los sistemas caóticos mediante el uso de exponentes de Lyapunov. Como se puede observar, existen diversas formas de describir y detallar la dinámica de los sistemas caóticos.

La sincronización es un fenómeno en el cual dos o más osciladores autosostenidos ajustan sus ritmos debido a una interacción débil en magnitud, según lo señalan Pikovsky et al. (2001). De manera análoga, la sincronización caótica hace referencia al ajuste de cierta propiedad de su movimiento a un comportamiento común debido a un acoplamiento o una fuerza que actúa sobre los sistemas, ya sea periódica o aleatoria, como lo mencionan Pecora & Carroll (1990).

El fenómeno de sincronización en todas sus variantes como lo detallan Pikovsky et al. (2001) y Ramírez-Ávila (2007) se evidenció en una amplia variedad de campos. En la biología: Conradt & List (2008) afirman que los grupos de animales tienden a tomar decisiones sincronizadas sobre migración, anidación y actividades en común, como la cría cooperativa o la caza, que afectan a su supervivencia y reproducción; Buck (1935) detalla sobre la observación realizada por Purcell y Morse en Filipinas sobre la sincronización de los destellos luminosos emitidos por las luciérnagas y cuya modelación es explicada en detalle por Ramírez-Ávila et al. (2019). Por otro lado, en la sociología, Subieta-Frias & Ramírez-Ávila (2017) caracterizan la opinión que pueden llegar a tomar un grupo de individuos a partir de la influencia de una fuente externa, la cual puede inducir en algunos de los individuos la toma de una decisión consensuada (sincronizada). En un sistema relacionado con psicología, Song & Yang (2009) sientan las bases para el estudio de la sincronización de las emociones en un grupo de individuos. Además, en la economía, Volos et al. (2012) presentan un modelo con dos ciclos económicos acoplados que debido a la interacción entre los mismos alcanzan un enganche de fases que es una de las características de la sincronización.

La sincronización completa fue ampliamente estudiada y de acuerdo con Boccaletti et al. (2002) ocurre cuando tanto la amplitud como la fase de los sistemas están enganchadas. Para caracterizar la sincronización completa se deben definir indicadores, los cuales dependen del sistema; por ejemplo: Bustos-Espinoza & Ramírez-Ávila (2016) acoplan dos osciladores conocidos como mapas logísticos, y definen un indicador el cual está dado por la distancia euclidiana de la variable dinámica de cada uno de los mapas encontrando regiones características de sincronización conocidas como lenguas de Arnold; mientras que, Abarbanel et al. (2001) acoplan dos láseres semiconductores en un sistema maestro-esclavo y definen un indicador para la sincronización, el cual está dado por el promedio del cociente de la distancia euclidiana de las variables de los sistemas, entre el promedio de las variables asociadas al sistema maestro.

Los láseres semiconductores deben esta denominación debido a que funcionan mediante la emisión estimulada en semiconductores que actúan como medios activos, donde los niveles de energía se expan-

den debido a los iones en la estructura cristalina, formando bandas de energía. La banda de valencia, ocupada por electrones, está debajo de la banda de conducción, separadas por el denominado gap o espaciamiento que es una región sin niveles de energía disponibles. En una unión $p-n$, las bandas de energía se configuran de modo que los electrones de la banda de conducción en la región n no pueden cruzar a la región p y viceversa. Al aplicar un campo eléctrico, esta configuración se altera, permitiendo el paso de portadores de carga y facilitando la recombinación de electrones y huecos. En materiales de gap directo, esta recombinación resulta en la emisión de fotones y, si la inversión de población alcanza un umbral específico, se produce la emisión estimulada de un láser semiconductor, según Alonso Fernández et al. (2010).

En el presente artículo se abordará el estudio de un sistema físico compuesto por dos láseres semiconductores acoplados haciendo énfasis en su dinámica y la sincronización que pueden alcanzar. Existen varios trabajos previos relacionados con estas áreas, a continuación detallamos algunos de ellos: En relación con la dinámica. Heiligenthal et al. (2013) realizan un estudio de láseres semiconductores acoplados con base en las ecuaciones propuestas por Lang-Kobayashi para el campo eléctrico y número de portadores, utilizando los exponentes de Lyapunov y mostrando el surgimiento de un comportamiento caótico en términos del parámetro asociado a la corriente proporcionada al sistema. Blackbeard et al. (2011) estudian la dinámica de tres láseres acoplados utilizando para su descripción diagramas de bifurcación y exponentes de Lyapunov. En la misma línea de sincronización de láseres acoplados. Annovazzi-Lodi et al. (1996) usando el modelo propuesto por Lang-Kobayashi y por medio de integración numérica, demostraron que los láseres se pueden sincronizar variando el parámetro asociado a la retroalimentación óptica. Mirasso (2000), demuestra que su modelo propuesto para la dinámica del campo eléctrico y número de portadores dentro de la cavidad de dos láseres acoplados podía alcanzar la sincronización cuando uno de ellos influía a través de la inyección en un láser receptor. Además, se muestra también que un mensaje puede codificarse en la señal emitida por el láser emisor, transmitirse a través de una fibra óptica y decodificarse en el láser receptor.

A lo largo de este trabajo, se describe la dinámica de dos láseres acoplados unidireccionalmente; además, se determinan regiones de sincronización y se propone un método para caracterizar la dinámica en dichas zonas.

El presente artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2, se detalla el modelo utilizado y se explica el significado de los parámetros de control; también se introducen los indicadores de sincronización. En la sección 3, se da a conocer la metodología utilizada y se muestran los resultados numéricos obtenidos. Finalmente, en la sección 4, se presentan las conclusiones derivadas de nuestra investigación, junto con algunas perspectivas para futuros trabajos en este campo.

2. MODELO

Existen varios modelos que describen la dinámica de dos láseres acoplados. Debido a la consideración de varios aspectos importantes tales como la presencia de ruido y la inclusión de retardo, para caracterizar la dinámica de dos láseres acoplados, en una configuración maestro-esclavo, se escogió el modelo propuesto por Mirasso (2000) dado por el sistema descrito en la Ec. (1). Este modelo proporciona ecuaciones que describen la variación del campo eléctrico $E_{t,r}$ y del número de portadores $N_{t,r}$ dentro de la cavidad, donde t y r hacen referencia al sistema maestro y esclavo, respectivamente.

$$\begin{aligned} \frac{dE_{t,r}}{dt} &= (1 + j\alpha_{t,r}) \left(G_{t,r} - \frac{1}{\tau_{t,r}} \right) \frac{E_{t,r}}{2} \\ &\quad + \gamma E_{t,r}(t - \tau) e^{j\omega_{t,r}\tau} \\ &\quad + \kappa_{\tau} E_{\text{ext}}(t) e^{-j\Delta\omega t} \\ &\quad + \sqrt{2\beta} N_{t,r}(t) \xi(t) \\ \frac{dN_{t,r}}{dt} &= \frac{I}{e} - \frac{1}{\tau_n} N_{t,r}(t) - G_{t,r} |E_{t,r}|^2 \\ G_{t,r} &= \frac{g(N_{t,r} - N_0)}{1 + s|E_{t,r}|^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Los parámetros son: $g = 1.5 \times 10^{-8} \text{ ps}^{-1}$ es el parámetro de ganancia, $s = 5 \times 10^{-7}$ es el coeficiente de saturación de ganancia, $\alpha = 5$ es el parámetro asociado a la intensificación del ancho de línea, $\beta = 1.1 \times 10^{-9} \text{ ps}^{-1}$ es la tasa de emisión espontánea, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ es la carga electrónica, $\tau_n = 2 \text{ ns}$ es el tiempo de vida del portador, $\tau_{t,r} = 2 \text{ ps}$ es el tiempo de vida del fotón, $N_0 = 1.5 \times 10^8$ es el número de portadores en la transparencia, $\gamma = 30 \text{ ns}^{-1}$ es el coeficiente de retroalimentación, τ es el tiempo de ida y vuelta en la cavidad externa, $\Delta\omega$ es la diferencia entre las frecuencias ópticas de los láseres cuando estos están desacoplados, $I = 44 \text{ mA}$ es la corriente de sesgo y $\omega_{t,r} \approx 1.2 \times 10^3 \text{ ps}^{-1}$ es la frecuencia angular de ambos láseres bajo operación de onda continua, $\kappa_{\tau} = 18 \text{ ns}^{-1}$ es el coeficiente de acoplamiento. Es importante destacar que en las siguientes secciones modificaremos algunos parámetros de control, en caso de no especificar dichas variaciones, se debe asumir que se han utilizado los valores de referencia presentados anteriormente.

El sistema tiene presencia de varios términos importantes, como son: $E_{t,r}(t - \tau)$ que indica que estamos ante ecuaciones diferenciales con retardo, las ecuaciones diferenciales con retardo involucran derivadas dependientes del pasado, usadas para modelar sistemas con influencia temporal pasada; el proceso aleatorio de emisión espontánea es modelizado con un término de ruido Gaussiano $\xi(t)$, usando una distribución normal con una varianza de 25 y media igual a cero; el término $\kappa_{\tau} E_{\text{ext}}$ tiene en cuenta la señal de entrada en el receptor y κ_{τ} es el parámetro de acoplamiento del campo inyectado en el láser

esclavo, cabe recalcar que este término sólo ejerce influencia en el láser receptor.

El sistema de ecuaciones diferenciales (1), se descompone en seis ecuaciones diferenciales, con partes reales e imaginarias determinadas por la presencia de j (unidad imaginaria): dos para las componentes x e y del campo eléctrico correspondiente al transmisor (E_{tx}, E_{ty}), dos para las mismas componentes correspondientes al receptor (E_{rx}, E_{ry}) y dos para los números de ocupación de ambos láseres (N_t, N_r). Entonces, el campo complejo del láser está definido por $E = E_x + jE_y$ se tendrá que la potencia óptica de salida en ambos casos, serán:

$$P_E = E_{tx}^2 + E_{ty}^2 \quad \text{y} \quad P_R = E_{rx}^2 + E_{ry}^2 \quad (2)$$

Con el fin de caracterizar la sincronización de dos láseres acoplados, se calculará el cociente $P_R(t)/P_E(t)$ de las potencias de salida para luego obtener su valor medio, al cual denominaremos como el índice de sincronización $\langle \varepsilon_P \rangle = \langle P_R(t)/P_E(t) \rangle$, este valor será mayor o igual a uno, ya que estamos trabajando con láseres idénticos, siendo la única diferencia entre ellos las condiciones iniciales; además, se usará un segundo indicador al cual llamaremos error medio del índice de sincronización $\Delta \varepsilon_P \% = \sigma_P / N^{1/2}$, dado por el cociente de la desviación estándar del índice de sincronización entre la raíz cuadrada del número de datos considerados, este valor tiende a cero en presencia de sincronización.

3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

El modelo propuesto fue resuelto por integración numérica empleando el software de acceso abierto XPPAUT desarrollado por Ermentrout (2002), el cual a su vez utiliza para la integración de ecuaciones diferenciales estocásticas el método de Euler con paso adaptativo. Las condiciones iniciales para el láser transmisor son $(E_{tx_0}, E_{ty_0}, N_{t_0}) = (3.2, 0.4, 1.5 \times 10^8)$, mientras que para el láser receptor las condiciones iniciales son $(E_{rx_0}, E_{ry_0}, N_{r_0}) = (4.3, 0.6, 1.5 \times 10^8)$, y los parámetros de control y términos usados toman los valores mencionados en la sección 2. Tanto para el estudio de la dinámica como para la búsqueda de regiones de sincronización del sistema, las series temporales se generaron de la siguiente manera: Se observó que el sistema alcanzaba la estabilidad en aproximadamente 120 ns, es por este motivo que se toma este valor como tiempo final. Se optó por tomar un valor pequeño de 1 ps como base de paso de tiempo para garantizar la exactitud de los resultados numéricos obtenidos comparados con respecto a otros métodos de integración más sofisticados como el descrito por Honeycutt (1992); lo anterior implica hacer 120000 cálculos para cada serie temporal.

3.1. Caracterización de la Dinámica

Para la obtención de los diagramas de bifurcación mostrados en la Fig. 1, se debe trabajar con el sistema en su situación estable, es por eso que se optó por tomar como transitorio 110 ns, es decir, se trabajó con los 10000 pasos de tiempo finales de la serie temporal, de los cuales buscamos sus máximos y

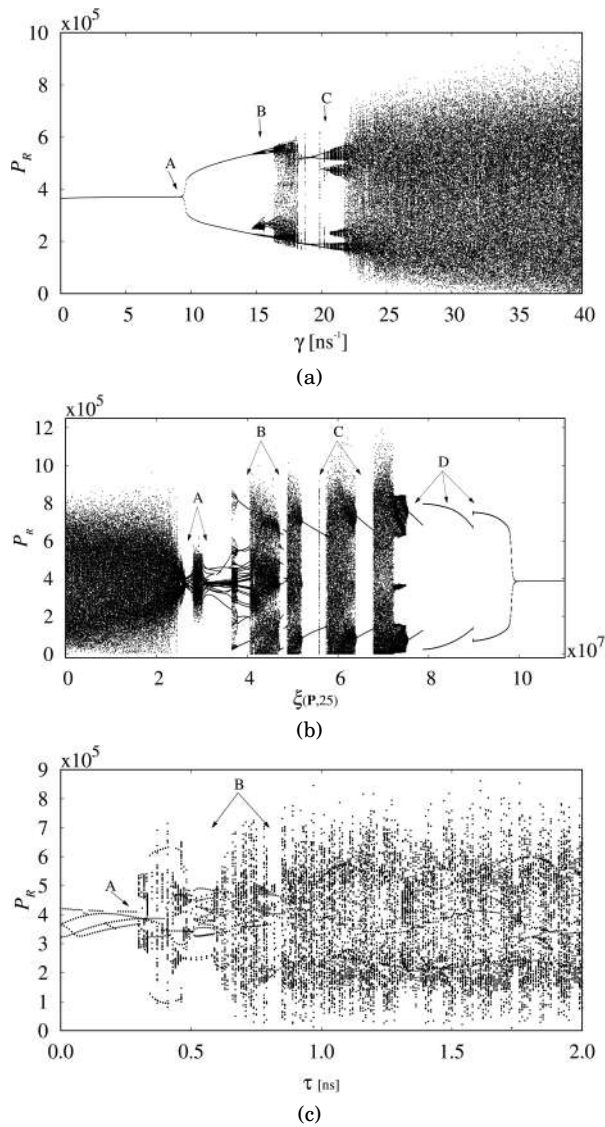


Fig. 1.— Diagramas de bifurcación que muestran la dinámica de la potencia de salida del láser receptor en función: (a) del parámetro de control γ , (b) del promedio asociado a la distribución normal, la cual está relacionada con el término asociado al ruido $\xi(t)$, (c) del retardo τ .

mínimos relativos. Se realizó este cálculo para 800 valores del parámetro de control. Dando así un total de 8×10^6 cálculos.

Con el fin de tener una comprensión más profunda de la dinámica del sistema, se obtienen los planos de parámetros que muestren la periodicidad del sistema, de manera similar a lo realizado por Ramírez-Ávila & Gallas (2011). De forma análoga a los diagramas de bifurcación, debemos buscar los máximos y mínimos de las series temporales del sistema. Además, se deben establecer condiciones para determinar el comportamiento en sistemas continuos (o por lo menos para el modelo estudiado dado que este presenta mínimas fluctuaciones). En la Fig. 2(c), se pueden observar pequeñas fluctuaciones en la potencia de salida del láser receptor. Estas fluctuaciones son del orden de las décimas. Sin embargo, la escala del sistema es del orden de 10^5 , por lo que es posible

definir un error, el cual es de una unidad. Así, se caracteriza la dinámica de la siguiente manera:

- Se considera como comportamiento estacionario a la situación en la cual todos los máximos y mínimos relativos en la serie temporal difieren a lo sumo en una unidad como se muestra en la Fig. 2(c), donde se hace notar que a diferencia de las ecuaciones diferenciales sin ruido donde la situación de punto fijo implica tener un valor constante de la variable dinámica, la estacionariedad en el caso estocástico implica una señal ruidosa (fluctuación) de pequeña amplitud.

- La periodicidad de una serie temporal está dada por la siguiente relación: periodicidad = np , donde np hace referencia al número de puntos máximos o mínimos relativos que le toma al sistema en volver a una situación aproximada a la inicial, donde la diferencia máxima entre estados correspondientes es de una unidad. Las Figs. 2(d) y 2(e) ilustran los casos de periodicidad 1 y 2 respectivamente.

- Una serie temporal presenta comportamiento caótico si no cumple con ninguna de las dos condiciones mencionadas anteriormente.

Dadas estas condiciones, integramos las ecuaciones del sistema para obtener las correspondientes series temporales variando dos parámetros de control, por lo que obtenemos los denominados planos de parámetros. Se realizó este cálculo para 81 valores distintos del término asociado al retardo y el parámetro de control asociado a la retroalimentación, lo que sumó un total de 6.4×10^7 cálculos.

En el diagrama de bifurcación de la Fig. 1(a), se pueden apreciar los diferentes comportamientos que presenta el sistema a medida que incrementamos el parámetro de control γ asociado a la retroalimentación. Desde el inicio hasta el punto (A), se observa que el sistema exhibe un comportamiento estacionario. Posteriormente, se ve un desdoblamiento de periodicidad hasta el punto (B), seguido de una región caótica y la reaparición de comportamiento periódico, culminando en el punto (C). A continuación de este punto, se observa nuevamente una región caótica.

En la Fig. 1(b), se presenta el diagrama de bifurcación correspondiente al promedio de la distribución normal asociada al ruido generado por la emisión espontánea. Inicialmente, se observa un comportamiento caótico, donde surgen algunas regiones que parecen ser periódicas, como se puede apreciar en los puntos (A), (B) y (C); Posteriormente, en la región (D), se observa un comportamiento de periodicidad 1; Después de la región (D), se puede observar un comportamiento estacionario.

En la Fig. 1(c) se presenta el diagrama de bifurcación asociado al retardo, donde predomina el comportamiento caótico; sin embargo, se observan regiones en las cuales el comportamiento da indicios de periodicidad. Según crece τ hasta el punto (A), se observa una región que presenta las características de periodicidad, pero en realidad se trata de una zona estacionaria donde la potencia de salida del láser se modifica según variamos τ . Posteriormente, se señalan las regiones (B) las cuales presentan un comportamiento que indica periodicidad.

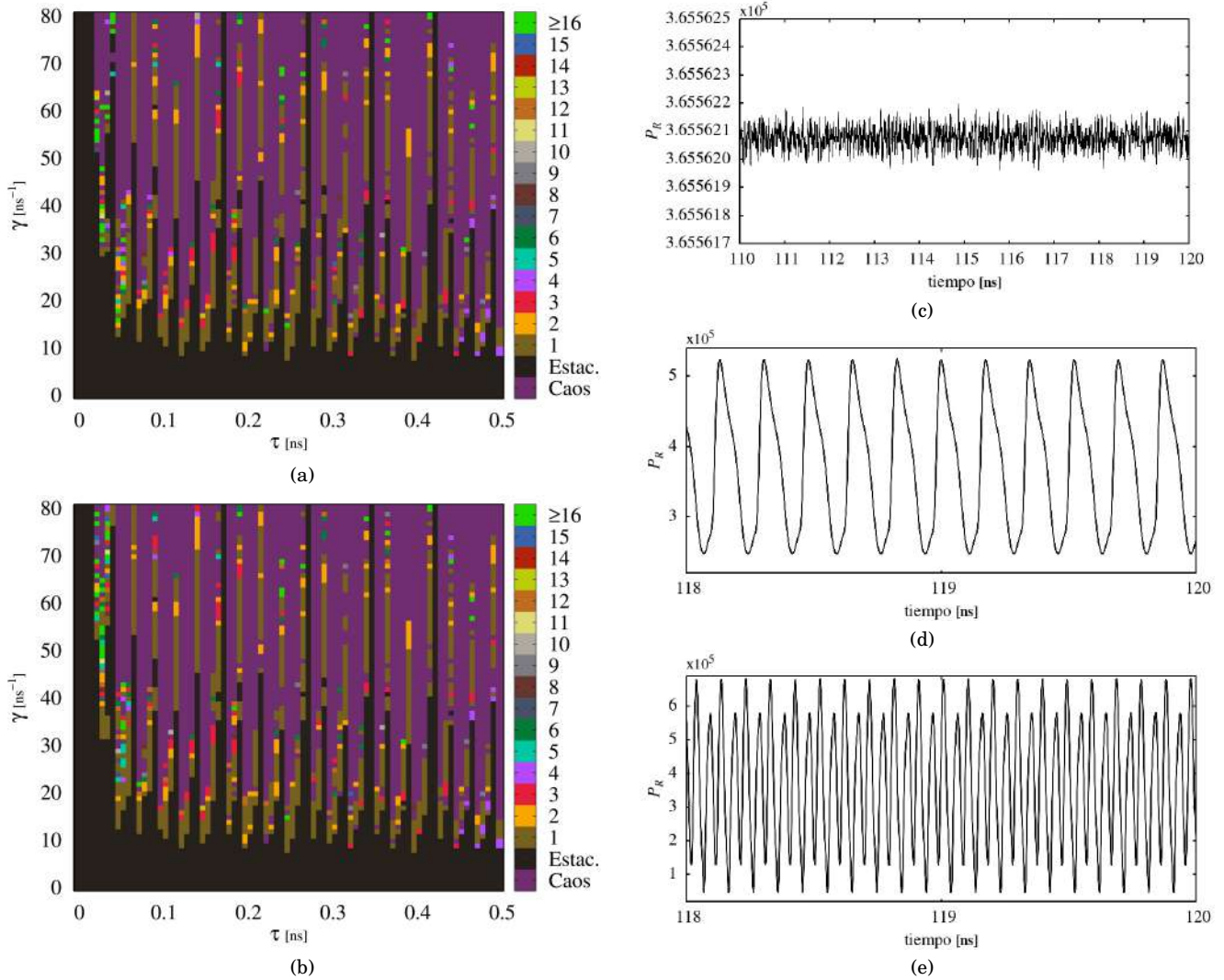


Fig. 2.— Periodicidades en el espacio bidimensional γ vs. τ , para el modelo de dos láseres acoplados para el: (a) láser receptor, (b) láser transmisor. Series temporales que muestran la variedad de comportamientos dinámicos del láser receptor: (c) estacionario, el cual presenta pequeñas fluctuaciones en relación al orden de magnitud de las amplitudes de las oscilaciones del sistema, $\gamma = 2 \text{ ns}^{-1}$, (d) regular con periodicidad 1, $\gamma = 19 \text{ ns}^{-1}$, (e) regular con periodicidad 2, $\gamma = 13 \text{ ns}^{-1}$; siendo en todos los casos el valor del retardo $\tau = 0.30625 \text{ ns}$.

En las Figs. 2(a)-2(b), se puede observar los planos de parámetros γ vs. τ , tanto para el láser transmisor como para el láser receptor, donde se muestran los comportamientos de las potencias de salida. Cabe destacar la similitud en el comportamiento que presentan ambos sistemas, donde predominan los regímenes caóticos y estacionarios. En el límite entre las regiones caótica y estacionaria se puede observar que se destacan zonas de periodicidad 1, donde además aparecen zonas de periodicidad mayor. Se constata que según crece el término τ surgen regiones estrechas de comportamiento estacionario.

3.2. Caracterización de la sincronización

Para caracterizar la sincronización del sistema, se utilizaron el índice de sincronización y el error del índice de sincronización, posteriormente se propone un método para obtener las periodicidades de las regiones de sincronización.

La metodología usada para encontrar las regiones

de sincronización es similar a la usada en el cálculo de periodicidades. Inicialmente, se variaron dos parámetros de control para 81 valores distintos, tomando un transitorio de 110 ns, lo que implica realizar aproximadamente 6.4×10^7 cálculos. Posteriormente, se realiza el cálculo de los indicadores; así, para el índice de sincronización, se trunca el mismo cuando alcanza el valor 2, esto por la existencia de valores muy altos que dificultan su distinción en los diagramas de colores. Similarmente, se trunca el error del índice de sincronización al 5%. Lo anterior significa que para los casos en los que los valores de $\langle \varepsilon_P \rangle$ y $\Delta \varepsilon_P \%$ son mayores a 2 y a 5% respectivamente, estos estarán representados en amarillo en los planos de parámetros en los que se utilizan estos indicadores.

Se realizó también un estudio de la dinámica de las regiones de sincronización del sistema en términos de sus periodicidades, de la siguiente manera: Las Figs. 2(a)-2(b) representan las periodicidades

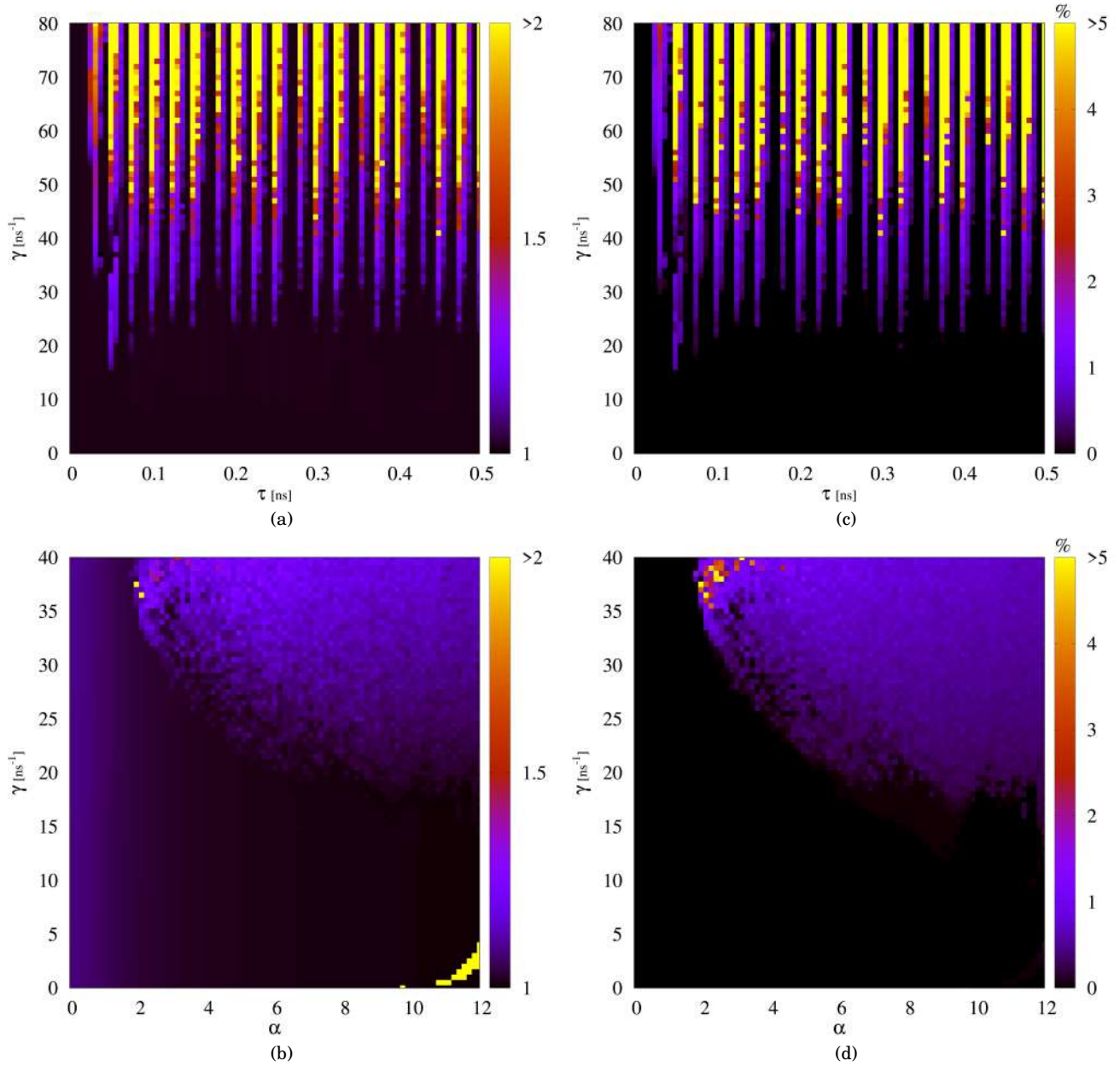


Fig. 3.— Caracterización de la sincronización de dos láseres acoplados unidireccionalmente por medio del índice de sincronización y el error del índice de sincronización. γ vs. τ : (a) índice de sincronización, (b) Error del índice de sincronización. γ vs. α : (c) índice de sincronización, (d) error del índice de sincronización.

del láser receptor y transmisor, respectivamente. A través de la información de estos dos espacios de parámetros, podemos determinar el comportamiento de ambos láseres, ya sea periódico, caótico o estacionario. En caso de que ambos láseres exhiban el mismo comportamiento estaríamos hablando de una cierta sincronización, la cual debemos verificar mediante el error del índice de sincronización, este indicador debe ser menor o igual a 0.1 %.

En las Figs. 3(a) y 3(c), se presenta el índice de sincronización y error del índice de sincronización, respecto al parámetro de control asociado a la retroalimentación y el término de retardo. En ambas gráficas se puede observar una cierta similitud, donde se destacan unos picos oscuros que a medida que crece

τ hay alternancias, de manera similar a lo que se observó en el cálculo de periodicidades para los mismos términos, como se observan en las Figs. 2(a)-2(b).

En la Fig. 3(b), se observa el índice de sincronización para γ vs. α , donde se nota que este índice es mayor a 1, lo cual es plausible, ya que está determinado por el cociente de la potencia del láser receptor entre la potencia del láser transmisor. Aunque este índice es un indicador esencial, es importante destacar que no podemos considerar que existe sincronización basándonos únicamente en este indicador, ya que refleja la diferencia entre las amplitudes de las potencias de salida de los láseres. Las regiones oscuras indican zonas donde las potencias de salida de los láseres se superponen, mientras que las regiones cla-

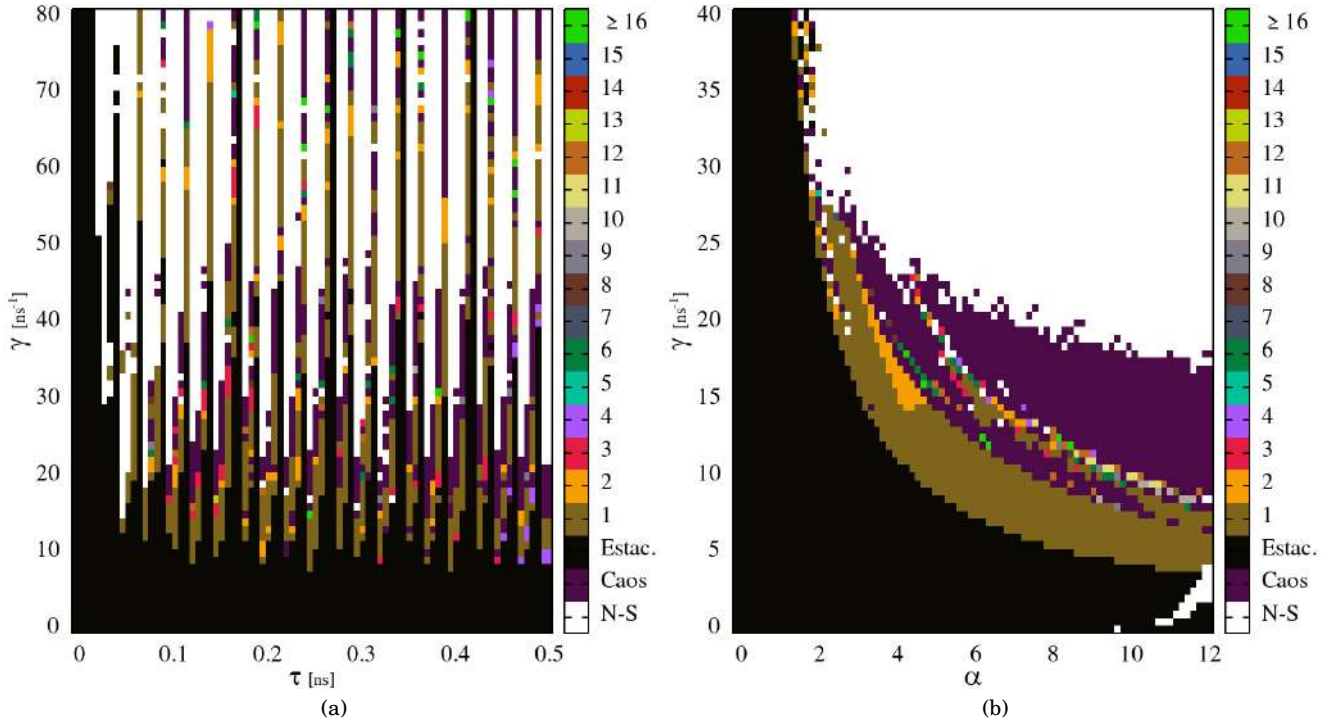


Fig. 4.— Caracterización de la sincronización mediante periodicidades de dos láseres acoplados unidireccionalmente. Donde: “N-S”, “Caos” y “Estac” indican asincronía (no sincronización), sincronización caótica y situación estacionaria respectivamente; en tanto que órdenes de sincronización asociados a una determinada periodicidad se expresan por los colores asociados a números correspondientes a los máximos o mínimos (picos o valles) de las oscilaciones periódicas. (a) γ vs. τ , (b) γ vs. α .

ras indican zonas donde existe una diferencia en las amplitudes de las potencias de salida de los láseres.

En la Fig. 3(d), se muestra el error del índice de sincronización para el parámetro de control asociado a la retroalimentación vs. intensificación del ancho de línea, en este caso el indicador sí caracteriza la sincronización puesto que las regiones oscuras indican que las potencias de salida se sincronizan mientras que las zonas claras indican que no lo hacen.

En la Fig. 4(a) se muestran regiones de sincronización que caracterizan el comportamiento que presentan las series temporales, para γ vs. τ . Se pueden identificar dos regiones principales. Una de ellas corresponde a la situación de comportamiento estacionario, mientras que la otra indica no sincronización. En el límite entre estas dos regiones, destacan las zonas de sincronización de periodicidad 1. Además, también se observan regiones de sincronización caótica y de periodicidades mayores a 1.

En la Fig. 4(b) se muestran regiones de sincronización y su comportamiento para γ vs. α . Se distinguen tres regiones principales: sincronización caótica, sincronización de periodicidad 1 y no sincronización. En una parte del límite entre las regiones de sincronización caótica y sincronización de periodicidad 1, se aprecia una zona de sincronización de periodicidad 2. Además, en la vecindad de la región de sincronización caótica se observa el surgimiento de regiones de sincronización de periodicidad mayor o igual a 1.

Es de destacar que tanto el índice de sincronización y el error del índice de sincronización, dependen del transitorio, dado que estos indicadores toman todos los datos de la serie temporal, y el hecho de

considerar un transitorio pequeño, puede hacer que los índices se vean afectados debido a que en ocasiones no se alcanza el comportamiento estable.

4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Se estudió el comportamiento dinámico y la sincronización de dos láseres acoplados en una configuración transmisor-receptor, variando los términos asociados al ruido, al retardo y a los parámetros de control de retroalimentación e intensificación de ancho de línea. El hecho de incluir ruido y retardo, hacen que este trabajo numérico aborde situaciones más próximas a las experimentales.

Se constató la importancia de los diagramas de bifurcación, pero se evidenció que en el modelo analizado, surgen comportamientos que sugieren periodicidad en los diagramas de bifurcación, cuando en realidad se trata de comportamientos estacionarios de distinta magnitud. Es por este motivo que se decidió llevar a cabo un estudio basado en el cálculo de periodicidades del sistema variando simultáneamente dos parámetros de control, lo cual nos permite caracterizar con mayor detalle la dinámica del sistema gracias a la determinación del número de picos y/o valles en las oscilaciones periódicas, lo que da cuenta de requerimientos computacionales mayores respecto a los diagramas de bifurcación convencionales.

Con base en los índices propuestos para caracterizar la sincronización, se encontraron regiones de sincronización, cuyos detalles se desconocían a priori. Sin embargo, la determinación conjunta de las periodicidades y de los indicadores de sincronización per-

mite la identificación de regiones síncronas, asíncronas y de estacionariedad, pudiendo las primeras presentar regímenes periódicos o caóticos. El requerimiento computacional para caracterizar la dinámica de las zonas de sincronización es ligeramente superior al correspondiente método tradicional para la determinación de sincronización.

Si bien en este trabajo nos centramos en el estudio de la variación temporal del campo eléctrico, queda abierta la posibilidad de analizar otras variables dinámicas del sistema. Además, es posible también considerar la variación de los otros parámetros de control y así tener una comprensión más profunda de la dinámica del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los comentarios y observaciones formuladas por el árbitro que de manera anónima ayudó a mejorar el artículo y a clarificar aspectos esenciales del mismo. DPA expresa su agradecimiento al Lic. Ricardo Forno Gisbert por sus valiosas críticas y observaciones en el campo de la física de los láseres a lo largo del desarrollo de este trabajo. GMRA agradece el financiamiento del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención Marie Skłodowska-Curie N° 101034383.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses respecto a la publicación de este documento.

REFERENCIAS

- Abarbanel, H., Kennel, M., Illing, L., Tang, S., Chen, H., & Liu, J. 2001, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 37, 1301
- Alonso Fernández, B. et al. 2010, *El láser, la luz de nuestro tiempo* (Isabel Arias Tobalina)
- Annovazzi-Lodi, V., Donati, S., & Scirè, A. 1996, *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 32, 953
- Arakawa, G. P. & Dutta, N. K. 1993, *Semiconductor Lasers* (New York: Van Nostrand Reinhold)
- Barbu, T. 2013, *Abstract and Applied Analysis*, 2013, 8 pages
- Blackbeard, N., Erzgräber, H., & Wieczorek, S. 2011, *SIAM J. Applied Dynamical Systems*, 10, 469
- Boccaletti, S. et al. 2002, *Physics Reports*, 366, 5
- Buck, J. B. 1935, *Science*, 81
- Bustos-Espinoza, R. O. & Ramírez-Ávila, G. M. 2016, *The European Physical Journal Special Topics*, 225, 2697
- Conradt, L. & List, C. 2008, *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 364, 719
- Ermentrout, B. 2002, *Simulating, Analyzing, and Animating Dynamical Systems: A Guide to XPPAUT for Researchers and Students* (Philadelphia: SIAM)
- Glendinning, P. 1994, *Stability, Instability and Chaos: An Introduction to the Theory of Nonlinear Differential Equations* (Cambridge University Press), accessed 29 September 2023
- Heiligenthal, S., Jüngling, T., D'Huys, O., Arroyo-Almanza, D. A., Soriano, M. C., Fischer, I., Kanter, I., & Kinzel, W. 2013, *Phys. Rev. E*, 88, 012902
- Honeycutt, R. L. 1992, *Phys. Rev. A*, 45, 600
- Kaplan, D. & Glass, L. 1995, *Understanding Nonlinear Dynamics* (New York: Springer-Verlag)
- Mirasso, C. R. 2000, *AIP Conference Proceedings*, 548, 112
- Nicolis, G. 1995, *Introduction to Nonlinear Science* (Cambridge University Press)
- Pecora, L. & Carroll, T. 1990, *Physical Review Letters*, 64, 821
- Pikovsky, A., Rosenblum, M., & Kurths, J. 2001, *Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Sciences*, Cambridge Nonlinear Science Series (Cambridge University Press)
- Poincaré, H. 2017, *The Three-Body Problem and the Equations of Dynamics: Poincaré's Foundational Work on Dynamical Systems Theory*, 1st edn., *Astrophysics and Space Science Library* (Springer Cham), XXII, 248
- Ramírez-Ávila, G. M. 2007, *Revista Boliviana de Educación Superior en Ciencias*, 7, 25
- Ramírez-Ávila, G. M. & Gallas, J. 2011, *Revista Boliviana de Física*, 19, 1
- Ramírez-Ávila, G. M., Kurths, J., Depickère, S., & Deneubourg, J.-L. *Modeling Fireflies Synchronization* (Springer Cham), 131–156
- Smith, H. 2010, *An Introduction to Delay Differential Equations with Applications to the Life Sciences*, Vol. 57
- Song, L. & Yang, J. 2009, in *2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 919 – 924
- Strogatz, S. H. 2018, *Nonlinear dynamics and chaos with student solutions manual: With applications to physics, biology, chemistry, and engineering* (CRC press)
- Subieta-Frias, V. & Ramírez-Ávila, G. M. 2017, *Revista Boliviana de Física*, 31, 3
- Volos, C., Kyprianidis, I., & Stouboulos, I. 2012, *WSEAS Transactions on Systems*, 11, 681

CÁLCULO DE LA CAPACIDAD ELÉCTRICA POR UNIDAD DE LONGITUD CON FINES DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

ELECTRICAL CAPACITY PER UNIT LENGTH CALCULATION FOR NONDESTRUCTIVE TESTING PURPOSES

ROLANDO SUNTURA^{a†}

Planetario Max Schreier, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia
(Recibido 11 de junio de 2023; aceptado 6 de diciembre de 2023)
<https://doi.org/10.53287/wipk4270fg54y>

RESUMEN

Mediante simulaciones numéricas se calcula la capacidad eléctrica por unidad de longitud en sistemas que representan columnas de concreto con hormigón armado. Se han elaborado tablas de datos de la capacidad por unidad de longitud y por unidad de permitividad eléctrica para los tipos de columnas de concreto de $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ y $60\text{cm} \times 60\text{cm}$ elegidos para las simulaciones. Los resultados están de acuerdo con las normas estructurales *ACI* y *NB1225001* que rigen actualmente en Bolivia. Los intervalos de tiempo de cómputo son de alrededor de seis a once horas de simulación. De esta manera, las tablas obtenidas pueden ser usadas con fines comparativos en estructuras similares a las de los diseños particulares estudiados en este trabajo, donde se utiliza el método de continuación analítica con órdenes de magnitud del error de truncación numérico de $10^{-5} \%$.

Palabras clave: Capacidad eléctrica – Simulaciones numéricas – Ensayos no-destructivos.

ABSTRACT

The electrical capacity per unit length was calculated in systems representing reinforced concrete columns using numerical simulations. Data tables were constructed for the capacity per unit length and per unit electrical permittivity for different column types: $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ and $60\text{cm} \times 60\text{cm}$, chosen for the simulations. The results are in accordance with the *ACI* and *NB1225001* structural standards currently in force in Bolivia. The tables obtained can be applied for comparative purposes in structures similar to those of the particular designs studied in this work, where the analytical continuation method is used with numerical truncation error orders of magnitude of $10^{-5} \%$.

Subject headings: Electrical capacity – Numerical simulations – Nondestructive test methods.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad muchas de las construcciones, tanto del área urbana como rural, están constituidas principalmente por estructuras hechas de hormigón, formado por materiales como acero, arena, cemento, PCV y madera (Lovera 2006). Debido a efectos inevitables, los hormigones sufren un deterioro con el pasar del tiempo, lo que conlleva a reducir su vida útil. Es por esta razón, que adquiere una gran importancia la evaluación de estas estructuras, analizando los desgastes que sufren, sus cambios y la distribución de los materiales para una inspección más profunda (Trujillo Triviño 2013). Existen muchas técnicas no destructivas para el monitoreo del comportamiento y consistencia en estas estructuras, algunas son limitadas y otras proporcionan una gran cantidad de

información útil (Yun 2007).

Algunas de las técnicas para analizar la calidad de recubrimiento de las estructuras del hormigón y la distribución de sus materiales proporcionan datos de la resistividad, el módulo de Young, el coeficiente de expansión térmica y la capacidad eléctrica del material (No 2002). Sin embargo, ninguna de estas técnicas proporciona información de la capacidad eléctrica por unidad de longitud, motivo por el cual, el presente trabajo se enfoca en proporcionar tablas de datos que permitan identificar la posición o ausencia de un determinado material, dada esta magnitud (Davis et al. 1998).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Tomando en cuenta todo lo mencionado, el trabajo consiste en una aplicación de simulaciones numéricas a columnas de concreto, para establecer la correspondencia entre los valores calculados de la capaci-

^a<https://orcid.org/0009-0002-9433-1208>

[†]Email: rsunturaq@fcfn.edu.bo

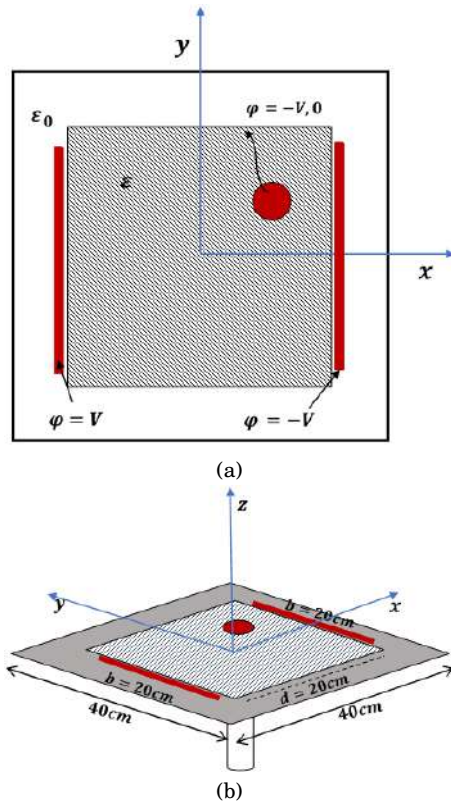


Fig. 1.— (a) Esquema de una sección transversal para una columna con barra conductora cilíndrica (en color rojo), dentro de un medio de permitividad ϵ y con potencial variable entre $-V$ o 0 . Las placas conductoras se representan también en color rojo y están apoyadas sobre caras opuestas de la columna con potenciales V y $-V$. (b) Sección rectangular de lados b y d , este último representa la distancia de separación entre las placas. El área de integración es un cuadrado de lado 40cm .

dad eléctrica por unidad de longitud y la distribución y forma de los conductores en el sistema. Gráficos y tablas de datos son generados con la finalidad de que los técnicos de inspección tengan a disposición una técnica de ensayos no destructivos consistente en determinar la capacidad por unidad de longitud del sistema en forma empírica y, comparando con la información disponible, puedan inferir el estado de la estructura estudiada. De manera general, los ensayos no destructivos fueron estudiados con distintas técnicas de monitoreo, algunas de ellas en el infrarrojo y otras con ultrasonido (Pérez Gracia 2001, Casali et al. 2007), sin embargo, pocos de ellos reportan técnicas de cálculo de la capacidad por unidad de longitud, que en nuestro caso estará aplicada específicamente a las columnas de concreto (Malhotra & Carino 2003).

3. MODELO TEÓRICO Y MÉTODO NUMÉRICO

Para la descripción completa del modelo teórico utilizado y sobre el método de resolución numérica aplicado, remitimos al lector a un trabajo anterior (Urzagasti 2022), donde se resuelve el problema de la obtención de la capacidad eléctrica por unidad de longitud de un sistema de dieléctricos y conductores con simetría bidimensional, con el propósito de ge-

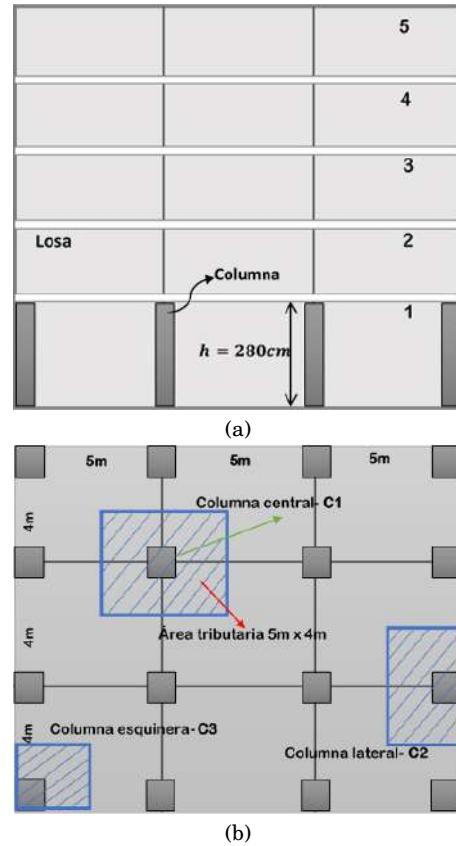


Fig. 2.— Modelo de predimensionado para un terreno de: (a) Estructura de tipo A para departamentos con cinco plantas, realizando un análisis de las columnas de la planta baja (b) Dimensión de $15\text{m} \times 12\text{m} = 180\text{m}^2$ de área considerada, con áreas tributarias de interés seleccionadas para columnas de tipo: C1, C2, C3.

neralizar los resultados obtenidos a sistemas de tres dimensiones espaciales.

4. CÁLCULO ESTRUCTURAL DE UNA COLUMNA DE CONCRETO

Es importante realizar un análisis estructural de las columnas de concreto que se van a estudiar en la presente aplicación, para lo cual, el cálculo se realiza con base en dos normas estructurales:

- *ACI318*: Una de las normas respecto al diseño de estructuras de concreto, en la que gran parte de los países latinoamericanos y los Estados Unidos, basan sus reglamentos nacionales de construcción casi en su totalidad.
- *NB1225001*: Esta norma proporciona las prescripciones que deben ser observadas en el diseño, ejecución y control de obras de hormigón estructural que fue realizada por el Ing. Marcelo Iriarte y se utiliza en toda Bolivia como un reglamento referencial.

4.1. Cantidad de acero en una columna

Utilizando como referencia las normas ya mencionadas, consideraremos para nuestro cálculo estruc-

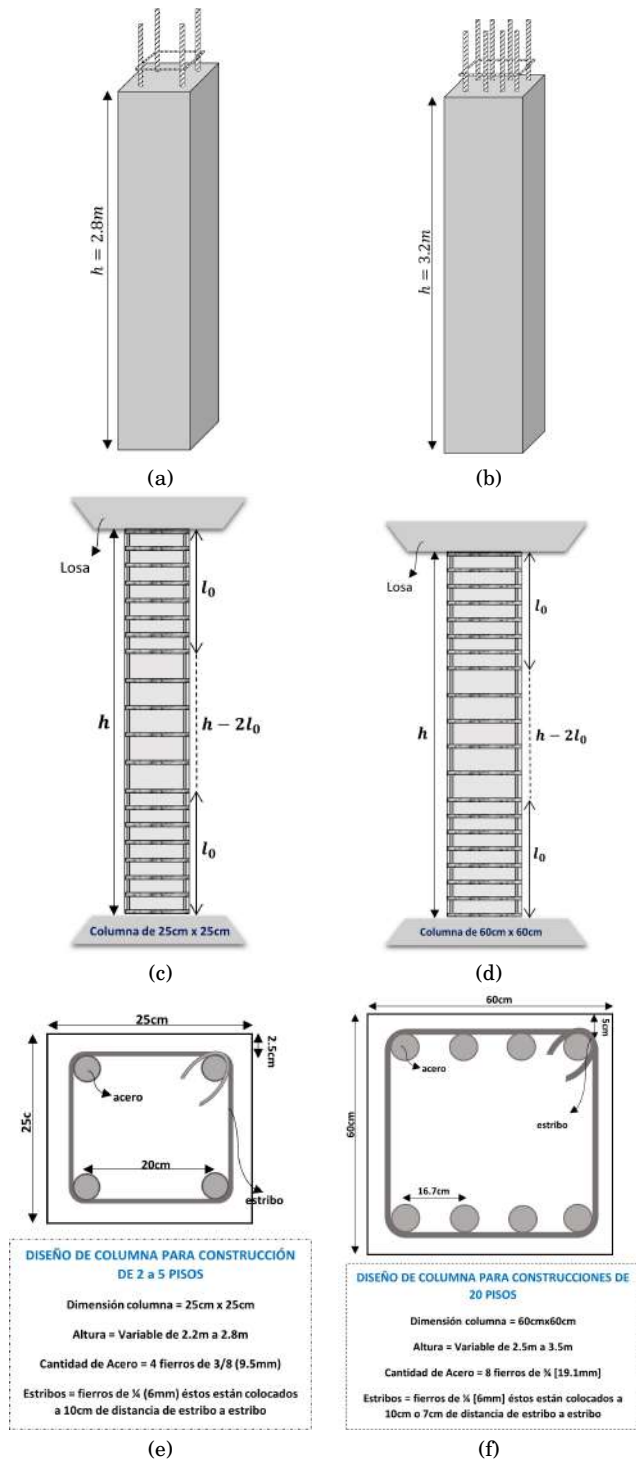


Fig. 3.— Cálculo estructural para columnas de dimensión $25cm \times 25cm$ y $60cm \times 60cm$. (a) y (b) Diseño de columnas para alturas h convencionales. (c) y (d) Distribución del acero longitudinal y transversal en las columnas. (e) y (f) Valores prácticos tomados en obra para construcciones de cinco a veinte pisos con cantidades de acero proporcionados por un ingeniero estructural.

tural, una obra de cinco pisos construida en una dimensión aproximada de $15m \times 12m = 180m^2$, que es la más convencional en las ciudades de Bolivia. Para el área de la columna empleamos la siguiente ecuación:

$$A = \frac{P_{serv}}{n f'_c}, \quad (1)$$

TABLA 1

Tabla de cálculo estructural para las columnas mostradas en la Figura 2.

Tipo de Columna	Área [cm^2]	Dimensión [cm^2]	A_{min}^1 (6%)	A_{max} (8%)	Acero ² mínimo
C-1 Central	952.4	35x35	57.1	76.2	6 de #10
C-2 Lateral	535.7	25x25	32.1	42.8	4 de #10
C-3 Esquinera	306.1	20x20	18.4	24.5	4 de #9

¹Se considera este valor mínimo para utilizarlo en tablas.

²Número de varillas estimadas obtenidas a partir de McCormac (2002).

donde A = área de la columna, P_{serv} = carga de servicio, f'_c = resistencia a la compresión para distintos tipos de hormigón, n = factor de influencia de momento, que tiene valores de $n = 0.35$ para una columna esquinera, $n = 0.40$ para una columna lateral y $n = 0.50$ para una columna central. A su vez la carga de servicio P_{serv} está dada por:

$$P_{serv} = A_T \cdot F \cdot N, \quad (2)$$

cuyos términos representan: A_T = área tributaria, F = carga que soporta la columna y N = número de losas. El valor de F para el caso de un departamento viene dado por la carga viva (CV), más la carga muerta (CM), más el peso propio (PP). De esta manera, consideraremos el peso que soporta la columna F con un valor aproximado de:

$$F = CV + CM + PP, \quad (3)$$

o bien,

$$F = 1.962[kN/m^2] + 2.943[kN/m^2] + 4.414[kN/m^2], \quad (4)$$

dando así un valor aproximado de $F \approx 10 [kN/m^2]$. Ahora bien, si realizamos cálculos de dimensiones para el caso de una columna central con $n = 0.5$, $f'_c = 210[kgf/cm^2] \approx 21MPa$ (valor típico para un determinado hormigón) (McCormac 2002) y el valor obtenido de $F \approx 10 [kN/m^2]$ con las Ecs. (1) y (2), se obtiene $A = 952.4 cm^2$. Tomando la raíz cuadrada de este valor, tendremos la dimensión aproximada para el ancho de la columna cuadrada en cuestión: $L = \sqrt{952.4 cm^2} \approx 30.86 cm$. Posteriormente se pueden realizar distintas combinaciones de números múltiplos de cinco, multiplicándolos hasta tener un valor no menor al obtenido anteriormente, pudiendo ser: $35cm \times 35cm = 1225 cm^2$, $30cm \times 35cm = 1050 cm^2$. Realizando el mismo cálculo para columnas esquineras y laterales se obtiene la Tabla 1.

Para el cálculo de acero tomamos las áreas A_{max} y A_{min} de acuerdo a la norma NB1225001, sección (10.6.1.1.), cuyos valores deben estar entre: $0.06A_s \leq A_s \leq 0.08A_s$, donde A_s representa la armadura de acero longitudinal.

4.2. Distribución de estribos en una columna

Analicemos el caso concreto de las barras transversales (estribos) para la columna estudiada anterior-

mente de $35\text{cm} \times 35\text{cm}$, las cuales están ubicadas en la sección transversal de la columna.

El diámetro mínimo de los estribos según la norma *ACI* es de 10mm , pero para casos reales, se suele usar siempre un diámetro inferior al de las barras longitudinales. Los estribos deben contener los aceros longitudinales de las esquinas; además, si la columna posee aceros longitudinales internos, también se colocan estribos para contenerlos. Los estribos están distribuidos de distinta forma tanto en su parte central como en la parte cercana a la losa (menos espaciados que en su parte central).

La distancia a la cual están distribuidos estos estribos en la parte superior e inferior, l_0 , debe cumplir el valor mayor de los siguientes tres requisitos según la norma *ACI*:

- La luz libre de la columna ($h = 280\text{cm}$) dividida entre 6, $l_0 = 46.7\text{cm}$.
- El valor de la sección transversal mayor en la columna, en nuestro caso: $l_0 = 35\text{cm}$.
- Un valor mínimo de 45cm .

Entonces, debemos escoger un valor de $l_0 = 46.7\text{cm}$ para la distancia de separación de los estribos en la parte superior e inferior.

Continuando con el espaciado máximo de los estribos, S_0 , considerando ϕ_l como diámetro longitudinal del acero y ϕ_t como diámetro transversal del acero (estribo), se debe tomar el menor valor de los siguientes cuatro requisitos según la norma *ACI*:

- Ocho veces el diámetro de la barra longitudinal $8\phi_l$, $S_0 = 8\text{cm}$.
- Veinticuatro veces el diámetro de la barra transversal de refuerzo o estribo, $24\phi_t$. En nuestro caso, tomando $\phi_t = 0.6\text{cm}$, $S_0 = 14.4\text{cm} \approx 15\text{cm}$.
- La menor sección transversal de la columna dividida entre 2, $S_0 = 17.5\text{cm}$.
- No debe ser mayor a 30cm .

Escogemos un valor de $S_0 = 8\text{cm}$ como espacio entre los estribos de la parte superior e inferior de la columna.

De igual forma para la parte central, el espaciado entre estribos debe cumplir con el menor de los tres requisitos siguientes:

- Dieciséis veces el diámetro de la barra longitudinal de la columna, $16\phi_l$, lo que da $S_0 = 20.3\text{cm}$.
- Cuarenta y ocho veces el diámetro de la barra transversal de refuerzo o estribo $48\phi_t$, dando $S_0 = 48\text{cm}$.
- La menor sección transversal de la columna que es 35cm .

Escogemos un valor aproximado de $S_0 = 20\text{cm}$ para el espacio entre los estribos de la parte central de la columna. Los estribos tienen un gancho de 135° en

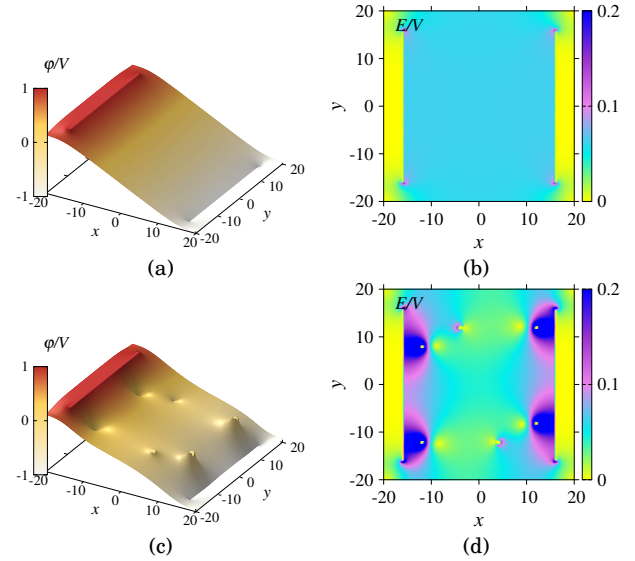


Fig. 4.— (a) y (b): Resultado numérico de un caso simple bidimensional con dos placas en ausencia de conductores entre ellas. (c) y (d): Caso de dos placas con seis barras de acero entre ellas cuyas posiciones fueron perturbadas a partir de la configuración de simetría. A la izquierda se observa el comportamiento del potencial en función de la posición y a la derecha el correspondiente comportamiento del campo eléctrico en términos de V .

su extremo, sus esquinas deben tener un diámetro mínimo de doblado de cuatro veces el diámetro de la barra, siendo para un diámetro de 10mm , un doblado de 4cm . La extensión del gancho es de 7.5cm .

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Predimensionado de columnas

En el análisis del predimensionado de columnas, con valores obtenidos en la Tabla 1, se tienen resultados teóricos aproximados a los puestos en obra. Como ejemplo, para el caso de una edificación con cinco plantas se llega a considerar valores para el cálculo en la dimensión, exclusivos para departamentos como menciona la norma *ACI*, los cuales pueden variar de acuerdo a las distintas edificaciones en el país. Ahora bien, específicamente, en columnas esquinas *C3* de $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ (véase Fig. 2(a) y (b)), obtenemos para la cantidad de acero longitudinal, un valor igual a 4 barras de #9 (diámetro de 9mm), lo cual no concuerda con los trabajos realizados en obra por ingenieros estructurales con más de 20 años de experiencia, según cuyos parámetros para la misma edificación de columnas, utilizan barras de acero longitudinal #10 (diámetro de 9.5mm) (véase Figura 3(e)). Posiblemente esto se deba a la falta de conocimiento de la norma boliviana *NB1225001* que rige actualmente en nuestro país. Otro factor podría ser el predimensionado con aproximaciones tomadas en los cálculos, pudiendo los mismos ser estudiados de forma más estricta para cada región, sin dejar de lado la experiencia en obra de los ingenieros estructurales.

Para la parte de la distribución de estribos en el caso de una columna de dimensión $35\text{cm} \times 35\text{cm}$, se obtuvieron distancias $l_0 = 46.7\text{cm}$ para las partes superior e inferior de la columna cercana a las losas

TABLA 2

Capacidad por unidad de longitud y por unidad de permitividad eléctrica para columnas de concreto de dimensión $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ y $60\text{cm} \times 60\text{cm}$ centrada en una caja cuadrada de integración de lado 40cm . El coeficiente de disipación usado es $\lambda = 0.7$ y una relación de permitividad para concreto igual a $\varepsilon/\varepsilon_0 = 10$.

# de Cilindros	Número de Corridas (bloque) 60x60	Número de Corridas (bloque) 25x25	tiempo de cálculo 60x60	tiempo de cálculo 25x25	Valor obtenido $\frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta C}{\Delta z}, 60\text{x}60$	Valor obtenido $\frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta C}{\Delta z}, 25\text{x}25$
8	19		6h 56min		9.014	
7	17		6h 56min		7.903	
6	14	24	5h 56min	6h 43min	7.632	9.266
5	20	20	6h 56min	6h 19min	7.692	7.954
4	20	20	6h 56min	6h 33min	6.549	7.913
3	16	20	5h 56min	5h 50min	5.428	6.680
2	20	20	8h 56min	5h 15min	5.210	6.679
1	18	18	11h 56min	11h 5min	5.209	5.308

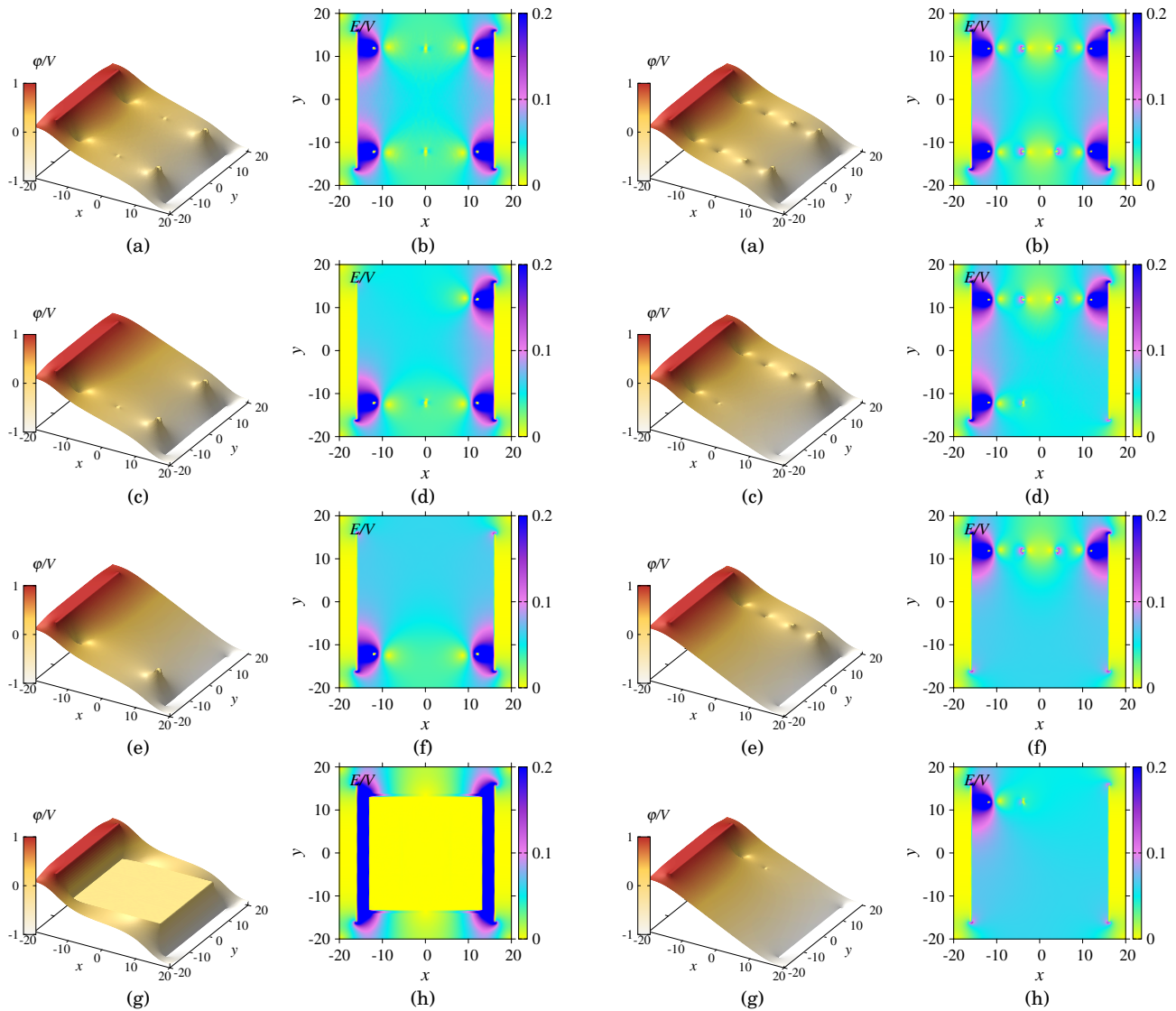


Fig. 5.— Resultados numéricos del caso bidimensional para columnas de $25\text{cm} \times 25\text{cm}$. (a) y (b) con 6 varillas, (c) y (d) con 4 varillas, (e) y (f) con 2 varillas, (g) y (h) con 6 varillas y un estribo rectangular.

Fig. 6.— Resultados numéricos del caso bidimensional para columnas de $60\text{cm} \times 60\text{cm}$. (a) y (b) con 8 varillas, (c) y (d) con 6 varillas, (e) y (f) con 4 varillas, (g) y (h) con 2 varillas.

con una distribución de espaciado entre estribos de $S_0 = 8\text{cm}$. Haciendo una simple división de estos dos valores obtenemos una cantidad de 12 estribos para las partes superior e inferior. Para la parte central de la columna con una longitud de $h - 2l_0 = 186.6\text{cm}$, se obtiene una distancia entre estribos de 20cm . Haciendo una comparación con el trabajo en obra, se percibe una arbitrariedad por parte de algunos ingenieros estructurales que realizan una distribución de estribos al tanteo, utilizando por lo general barras con diámetros de 6mm , siendo este último diferente a lo que rige en la norma con un valor mínimo de 10mm .

5.2. Caso inicial con ausencia de conductores dentro de la columna de concreto

A fin de poner a prueba el método, se considera el caso simple de dos placas apoyadas sobre dos caras opuestas de la columna rectangular (véase la Figura 4). Para este caso, la integración toma un tiempo de 2 horas y 15 min hasta que el sistema alcanza el equilibrio, lográndose obtener para la capacidad por unidad de longitud y de permitividad eléctrica un valor igual a $\Delta C/\Delta z\varepsilon = 4.054$. Este valor es algo mayor al valor teórico de 4 para una columna de $20\text{cm} \times 20\text{cm}$. Esto se atribuye al aumento de la intensidad del campo eléctrico en las regiones cercanas a los bordes de las placas, lo que no se consideró en el modelo teórico, dando así un error relativo porcentual de 1.33 %.

5.3. Aplicación a columnas de concreto

Aplicamos el método de resolución numérica bidimensional a distintos casos de interés, siendo éstos para columnas de dimensiones $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ y $60\text{cm} \times 60\text{cm}$, con y sin varillas conductoras, y también un caso con presencia de un estribo. Las Figuras 5 y 6 muestran el comportamiento del potencial y del campo eléctrico para diferentes casos de interés. Los parámetros de integración son: un valor de relación de permitividad del dieléctrico $\varepsilon/\varepsilon_0 = 10$, adecuado para el caso del concreto y un coeficiente disipativo $\lambda = 0.7$. Los correspondientes valores obtenidos para la capacidad por unidad de longitud de columna y por unidad de permitividad eléctrica se muestran en la Tabla 2.

5.4. Acerca de las simulaciones

Para las simulaciones numéricas se analizaron diferentes tipos de columnas, entre ellas, las columnas de $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ y $60\text{cm} \times 60\text{cm}$ con resultados gráficos presentados en las figuras 5 y 6, respectivamente, cuyos valores para la capacidad por unidad de longitud de columna y por unidad de permitividad eléctrica se muestran en la Tabla 2. Estos valores fueron tomados hasta un error de convergencia del tercer decimal, cuando el sistema ya alcanzó el equilibrio en tiempos de 6h a 11h, con un número de barras de acero longitudinal entre 1 a 6, para columnas de

$25\text{cm} \times 25\text{cm}$. Notemos que los puntos de color amarillo dentro de la columna, corresponden a las barras conductoras, además que, existe un aumento de intensidad del campo eléctrico cerca de los bordes de las placas. Existe un comportamiento similar para las columnas de $60\text{cm} \times 60\text{cm}$, variando el número de barras de acero de 8 a 1 (ver Tabla 2). Para las simulaciones mencionadas, se utiliza el método de continuación analítica para evitar cálculos computacionales de mayor duración en tiempo hasta lograr el equilibrio, cuyos órdenes de magnitud del error relativo están en $10^{-7}\%$, tanto para el potencial como para el campo eléctrico.

Para hacer uso de la Tabla 2, realizamos una comparación con un sistema perturbado, Fig. 4(b), para una columna de $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ con 6 barras de acero distribuidas bajo una configuración levemente diferente de la de completa simetría, obteniéndose un valor de capacidad por unidad de longitud de columna y por unidad de permitividad eléctrica igual a 9.505, con un tiempo estimado de 6h y 53 min hasta alcanzar el equilibrio. Comparando este valor con el valor de 9.266 reportado en la Tabla 2 con un tiempo de 6h y 43min, que se dan para barras longitudinales distribuidas de forma uniforme a lo largo de la columna, se obtiene una diferencia entre estos dos valores de 2.51 %.

6. CONCLUSIONES

Se elaboró la Tabla 2, con datos de la capacidad por unidad de longitud y por unidad de permitividad eléctrica para los tipos de columnas de $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ y $60\text{cm} \times 60\text{cm}$, escogidas para la simulación numérica. Los resultados que se muestran en dicha tabla están de acuerdo con las normas estructurales ACI y NB1225001 que rigen actualmente en todo el país. Podemos concluir que, usando el análisis numérico se pueden hacer simulaciones aplicadas a columnas de concreto, las cuales tienen mucha importancia para analizar nuevas técnicas de ensayos no destructivos. En este sentido, la tabla que se dispone sirve de comparación para detectar una buena distribución de las barras de acero en las dimensiones mencionadas, tal y como se hizo con la comparación con el caso perturbado para una columna de $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ de 6 barras de acero. Una desventaja para la simulación, es el tiempo de cómputo que se requiere para hacer el trabajo menos pesado, lo cual podría hacerse más eficiente con equipos modernos de computación. Para la parte del predimensionado de una columna y la distribución de los aceros longitudinales y transversales, se notó que muchas de las construcciones no se rigen a las normas al pie de la letra, lo que conlleva un riesgo para las edificaciones en nuestro país, debiendo ser analizadas para evitar desastres futuros.

Conflicto de intereses

El autor declara que no existe conflicto de intereses respecto a la publicación de este documento.

REFERENCIAS

- Casali, R. A., Caravaca, M. A., Acevedo, C., Miño, J. C., Bizzotto, M., & Torra, R. 2007, in IV Conferencia Panamericana de END, 1–12
- Davis, A., Ansari, F., Gaynor, R., Lozen, K., Rowe, T., Caratin, H., Heidbrink, F., Malhotra, V., Simons, B., Carino, N., et al. 1998, American Concrete Institute, ACI, 228
- Griffiths, D. J. 2021, Introduction to electrodynamics, Fourth Edition
- Jackson, J. D. 1999, Classical electrodynamics
- Lovera, G. F. G. 2006, Estudio en Estructuras de Hormigón Armado Mediante el Uso de un Radar de Penetración Terrestre (Universidad Austral de Chile)
- Malhotra, V. M. & Carino, N. J. 2003, Handbook on nondestructive testing of concrete (CRC press)
- McCormac, J. 2002, Diseño de concreto reforzado - 8va. Edición (Alfaomega Grupo Editor)
- No, T. C. S. 2002, Training Course Series
- Pérez Gracia, M. d. l. V. 2001, Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico (Universitat Politècnica de Catalunya)
- Trujillo Triviño, G. 2013, Disponible en: <https://hdl.handle.net/10901/9832>.
- Urzagasti, D. 2022, Revista Boliviana de Física, 40, 8
- Yun, K. 2007, SIAM Journal on Applied Mathematics, 67, 714

EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN UTILIZANDO EL EQUIPO EYECON
DE ULTRASONIDO, MEDIANTE TÉCNICAS COMPUTACIONALES
PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE LA IMAGEN SAFT

EVALUATION OF CONCRETE STRUCTURES USING THE EYECON
ULTRASOUND EQUIPMENT BY MEANS OF COMPUTATIONAL TECHNIQUES
FOR SAFT IMAGE RECONSTRUCTION

ELBA J. COLQUE-ZACARIAS^{1,a†} & E. PALENQUE V.^{1,b‡}

¹ Instituto de Investigaciones Físicas,
Universidad Mayor de San Andrés,
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario,
La Paz - Bolivia

(Recibido 31 de julio de 2023; aceptado 9 de diciembre de 2023)

<https://doi.org/10.53287/mtti6534ud32j>

RESUMEN

Se propone un nuevo algoritmo con base en el método *SAFT* de *END*, que permite manejar y procesar los datos del equipo *EYECON*, sin la necesidad del programa original del mismo. Para poder caracterizar el comportamiento de la señal de las ondas dentro de un medio, se elaboró un bloque de hormigón de clasificación regular con un espesor de 30 *cm*. Se realizaron medidas a diferentes velocidades con una frecuencia de 50 *kHz*, con el fin de comparar los resultados del comportamiento de la intensidad de la señal de la onda, entre el programa original y el programa elaborado. Esto permitió identificar con mayor precisión las delimitaciones de las zonas: muerta, campo cercano y campo lejano, lo cual contribuyó a determinar las características de funcionamiento del equipo.

Palabras clave: Hormigón – Ultrasonido – Ensayos no destructivos.

ABSTRACT

A new algorithm is proposed based on the *SAFT* method of *END* that allows for the management and processing of data from the *EYECON* equipment without the need for the original device program. In order to characterize the behavior of the wave signal within a medium, a regular classification concrete block with a thickness of 30 *cm* was elaborated. Measurements were carried out at different speeds at a frequency of 50 *kHz* in order to compare the results of the behavior of the wave signal intensity, between the original program and the one developed in this study. This allows us to determine with greater precision the delimitations of the zones: dead, near field and far field, which helped us to determine the operating characteristics of the equipment.

Subject headings: Concret – Ultrasound – Ultrasonics in nondestructive testing.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción es una de las principales actividades económicas en Bolivia que en los últimos años ha ido creciendo debido a las inversiones públicas y privadas. El material más utilizado es el hormigón, debido a sus cualidades de resistencia, durabilidad y versatilidad; sin embargo, se ha determinado que existen construcciones con deficiencias relacionadas con el proceso de elaboración del hormigón, lo cual

podría eventualmente generar fisuras, vacíos y algunos defectos que afectan la estructura de la construcción. Las principales razones para este tipo de problemas son: la mala dosificación de la mezcla, el sobre vibrado, mala distribución de capas de vaciado y segregación, entre otras. Por esta razón, es importante realizar pruebas mediante métodos de ensayos no destructivos (*END*), que ayuden a evaluar la calidad del hormigón (Kim et al. 2006). Uno de los métodos de *END* que permite determinar la resistencia real, vacíos, fisuras y otras anomalías en el interior del hormigón, es el del Pulso Ultrasónico mediante la técnica de pulso *ECO*, el cual consiste en enviar un pulso de ultrasonido de alta frecuencia a través

^a<https://orcid.org/0000-0003-0897-702X>

^b<https://orcid.org/0009-0008-8477-9483>

[†]Email: ecolque@fcfn.edu.bo

[‡]Email: epalenque@fiums.edu.bo

de transductores y recibir los pulsos reflejados (ecos) (De-La-Haza et al. 2013; Anoni et al. 2024). Existe una variedad de modelos de equipos que utilizan esta técnica de pulso, siendo los más utilizados los equipos que no necesitan gel de acoplamiento (contacto seco), donde además los transductores emisores y receptores están juntos y localizados en una misma cara, lo cual permite que el tiempo de viaje de la onda se mida de ida y vuelta.

En el presente trabajo, se reportan los resultados de la evaluación estructural de una muestra de hormigón elaborada bajo condiciones controladas, utilizando un equipo de ultrasonido *EYECON* que funciona con el método de pulso *ECO*. En la sección 2, se detallan las características técnicas del dispositivo utilizado, y en el Apéndice, se han incluido algunas características esenciales sobre su funcionamiento.

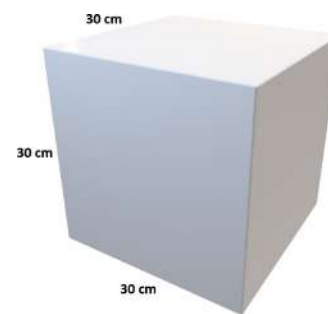
El equipo *EYECON* está provisto de una pantalla con diferentes modos de visualización directa de los registros obtenidos. No obstante, de modo preferente, los datos son transferidos a un computador para su procesamiento con el software *PlaneVisor*, que se distribuye junto con el equipo. Se evalúa el algoritmo del programa *PlaneVisor* disponible en laboratorio, el cual solo funciona bajo Windows XP, además que la calidad de colores en los gráficos no se muestra con buena resolución. En estas condiciones, se dificulta la observación de pequeñas fisuras o vacíos, y finalmente, no es posible un manejo flexible de la información obtenida.

Es por esta razón, que de manera adicional, el trabajo se enfoca en obtener registros de datos con el equipo de ultrasonido, para visualizar y procesar las imágenes “*scan B*”. Además, con el uso de técnicas computacionales combinadas con programas de procesamiento digital de imágenes, se puedan analizar las diferentes topografías de las fisuras o vacíos dentro de las muestras de hormigón, con un mayor detalle.

El artículo tiene el siguiente esquema: En la primera sección se describe el proceso de elaboración de una muestra de hormigón; en la segunda sección, las características del equipo de ultrasonido utilizado; en la tercera sección se explica el proceso de medición y la toma de datos; en la cuarta sección se detalla la técnica computacional elaborada para analizar los datos obtenidos. A continuación, en la quinta sección, se muestran los resultados relevantes, y finalmente, se presentan las principales conclusiones del trabajo.

2. ELABORACIÓN DE LA MUESTRA DE HORMIGÓN

Los insumos para elaborar la muestra fueron: cemento Viacha estándar de tipo *IP30*; agregado grueso proveniente de las canteras del Río Choqueyapu con piedras de tamaño máximo (*TM*) de $3/4''$; se utilizó agua potable en el desarrollo de las mezclas, cumpliendo las normas requeridas para obtener el hormigón con características *H21*, el cual lleva la proporción 1 : 2 : 4 (una parte de cemento, dos de agua y cuatro de arena y grava). Los equipos y herramientas necesarias para la elaboración de la muestra



(a)



(b)

Fig. 1.— (a) Esquema 3D del diseño. (b) Vista lateral de la muestra de hormigón.

fueron proveídas por el Laboratorio de Materia Condensada.

Una vez elaborada la mezcla, se procedió al encofrado, utilizando aceite de motor como desmoldante. Para la compactación se utilizó una varilla de 2 cm de diámetro, además se golpeó los extremos del molde para poder distribuir uniformemente la mezcla y mejorar la compactación. Finalmente se esperó el tiempo adecuado de fraguado (18 días) según la norma establecida por el *IBCH*, luego se procedió a desmoldar la muestra, obteniéndose el bloque con dimensiones de $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$, mostrado en la Figura 1(b).

3. EQUIPO DE ULTRASONIDO

Para el escaneo de los pulsos *ECO*, se utilizó el equipo *A1220 MONOLITH* de la Germany Instruments, que cuenta con 12 emisores y 12 receptores que funcionan con transductores de punta, como se muestra en la Figura 2. Este dispositivo permite analizar muestras de hasta aproximadamente un metro de profundidad.

Para el escaneo con el equipo de pulso *ECO*, se analizó una sola cara del cubo, realizando mediciones solo en el centro de la muestra, con el fin de evitar reflexión de las ondas por caras transversales (Haach & Ramirez 2016), lo que podría producir distorsiones en las mediciones. Todas las mediciones fueron realizadas con frecuencia de 50 kHz como recomienda la literatura.

4. METODOLOGÍA

El escaneo con pulso *ECO* se visualiza mediante el programa *PlaneVisor*. La resolución de las franjas escaneadas es de muy baja calidad por lo cual es difícil distinguir algunas imperfecciones, rajaduras o



Fig. 2.— Vista frontal del equipo pulso Eco.

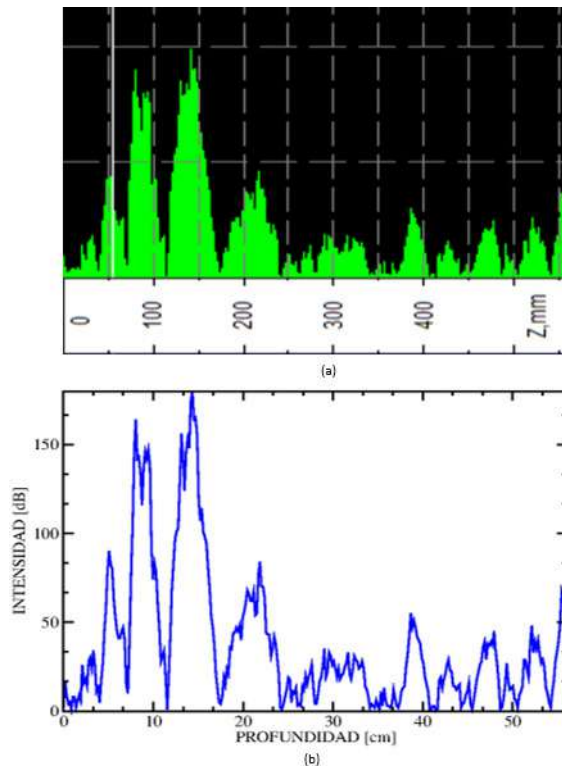


Fig. 3.— (a) Comportamiento de la intensidad (dB) en función de la profundidad (mm) dado en el programa PlaneVisor. (b) Comportamiento de la intensidad (dB) en función de la profundidad (cm) calculado por el algoritmo sugerido.

pequeños huecos (ver Apéndice Figura A1). Por este motivo, se elaboró un algoritmo capaz de realizar la lectura del archivo de datos para cada medición, con el propósito de procesarlos y, en primera instancia, replicar los gráficos de la intensidad de la señal de la onda generados por el programa PlaneVisor. La Figura 3, muestra la comparación de las intensidades de la señal de la onda generados por el algoritmo del programa original y el algoritmo propuesto, para una velocidad de 2500 m/s .

Una de las ventajas de haber replicado los resultados de la intensidad de la señal de la onda como lo muestra el programa PlaneVisor, es la facilidad de poder analizar de manera detallada el comportamiento de dichas intensidades para diferentes regio-

nes (profundidades).

Para realizar un análisis de la muestra de hormigón, sin la interferencia del agregado, se debe considerar la relación dada en la ecuación A2 (Apéndice). Lo ideal es que el TM del agregado sea menor que la mitad de la longitud de onda incidente (Lin & Wang 2020), para que así, el agregado no aparezca en las imágenes de ultrasonido. En nuestro caso, el valor de TM del agregado es de 19 mm . Para comprobar esta condición, se procedió a realizar el cálculo de los valores de la longitud de onda para distintas velocidades (desde 2000 m/s hasta 5000 m/s en intervalos de 200 m/s), usadas en el presente trabajo. Para la velocidad de 2000 m/s , la mitad de la longitud de onda es de 20 mm , la cual es mayor al TM del agregado, por lo que se pueden encontrar discontinuidades o posibles vacíos en el interior de la muestra de hormigón a partir de este valor. Para velocidades superiores, los valores de la media longitud de onda, son aún mayores.

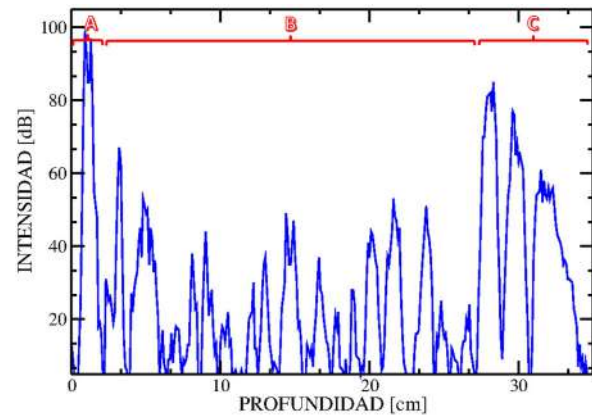


Fig. 4.— Comportamiento de la intensidad (dB) en función de la profundidad (cm) calculada por el algoritmo propuesto para la velocidad de 2200 m/s .

5. RESULTADOS

En esta sección, se analizan con el equipo de pulso *ECO*, las características de una muestra de hormigón de clasificación regular, según Graval (Malhotra & Carino 2003), que fue descrita en la sección 2. Para tal efecto, se realizaron medidas con diferentes velocidades, iniciando desde 2000 m/s hasta 5000 m/s en intervalos de 200 m/s , a una frecuencia de 50 kHz .

La Figura 4 muestra el comportamiento de la intensidad de la señal de la onda en función de la profundidad, para una velocidad de 2200 m/s , en la cual se pueden evidenciar tres zonas importantes. La zona muerta (A) en la cual se produce el eco de la emisión de la señal, muestra valores altos de intensidad, hasta cerca de 100 dB y se encuentra a poca distancia de la superficie de contacto, aproximadamente a 2 cm . Más allá de esta distancia, podemos observar la zona de campo cercano (B), en la cual la intensidad de la señal de la onda se regula en promedio a un valor de 30 dB , llegando hasta una profundidad

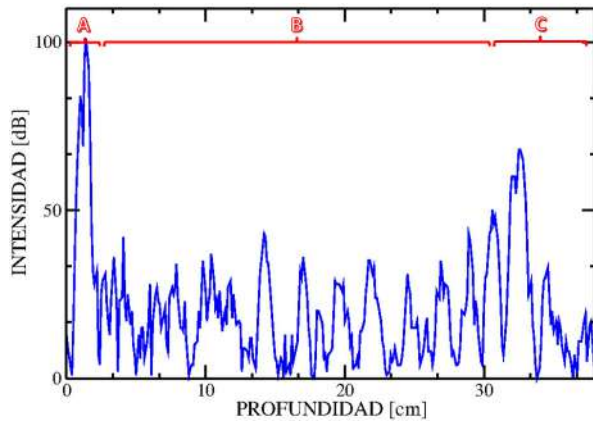


Fig. 5.— Comportamiento de la intensidad (dB) en función de la profundidad (cm) calculada por el algoritmo propuesto para la velocidad de 2400 m/s .

de aproximadamente 26 cm . Es importante destacar que en esta zona, existen oscilaciones en los valores de intensidad, debido a que la muestra no es totalmente homogénea. Finalmente, la zona de campo lejano (C), muestra un aumento de intensidad de la señal de la onda de aproximadamente 80 dB a partir de los 26 cm hasta los 35 cm de profundidad. La muestra tiene un espesor de 30 cm y el pico de intensidad se visualiza a una profundidad menor a este, por lo que se puede concluir que, con este valor de velocidad, no es posible analizar toda la profundidad de la muestra.

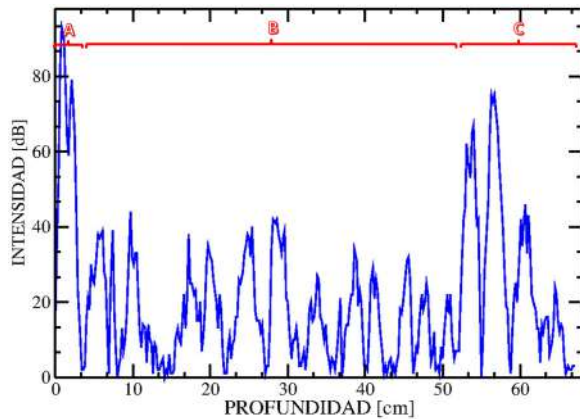


Fig. 6.— Comportamiento de la intensidad (dB) en función de la profundidad (cm) calculada por el algoritmo propuesto para la velocidad de 4200 m/s .

A continuación, en la Figura 5 se analiza el comportamiento de la intensidad de la señal de la onda en función de la profundidad a una velocidad de 2400 m/s , donde se identifican claramente las tres zonas. La zona (A) muestra una alta intensidad de la señal de la onda de aproximadamente 100 dB hasta una profundidad de aproximadamente 2.5 cm . Posteriormente comienza la zona (B), en la cual la intensidad de la señal de la onda se regula en un promedio de 20 dB hasta llegar a una profundidad de aproximadamente 30 cm . A partir de este punto comienza la zona C, en la cual ocurre una transición donde la in-

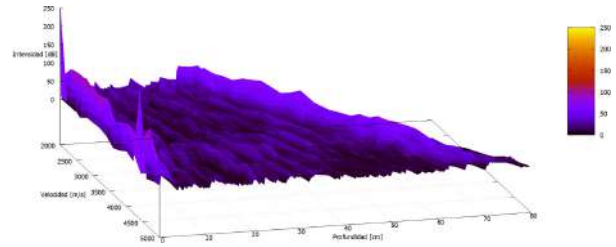


Fig. 7.— Comportamiento de la intensidad (dB) para velocidades desde los 2000 m/s hasta los 5000 m/s .

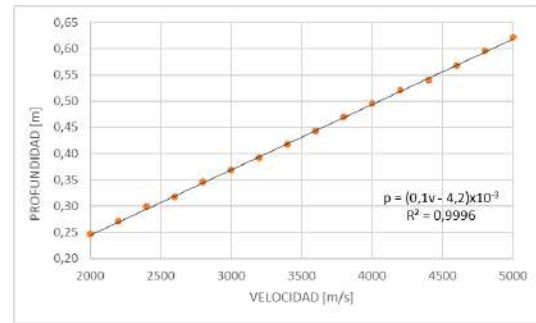


Fig. 8.— Representación de una regresión lineal simple para la relación entre velocidades y profundidades donde se produce la transición entre las zonas (B) y (C).

tensidad varía significativamente, la cual es generada por datos ficticios, tal como se explica en la sección A.5. del Apéndice. Para esta velocidad, la onda logra penetrar el espesor total de la muestra de hormigón, por tanto, se puede estudiar y visualizar con mejor precisión todas las diferentes características de la muestra.

Finalmente, la Figura 6 muestra los valores de la intensidad de la onda respecto a la profundidad para una velocidad de 4200 m/s , en la cual se puede observar que la zona (A) tiene una intensidad alta de 90 dB hasta aproximadamente 3.5 cm de profundidad. Seguidamente comienza la zona (B) en la cual la intensidad de la onda se regula, en promedio, a aproximadamente 20 dB a una profundidad de 52 cm . Posteriormente, inicia la zona (C), con un incremento de intensidad de 70 dB a una profundidad de 67 cm . Estos resultados muestran que, el pico de la intensidad de la onda se visualiza a una profundidad mayor al tamaño de la muestra, por lo cual se puede inferir que, para esta velocidad, no se puede analizar de manera correcta el espesor de la muestra.

Con todo lo mencionado anteriormente, se realizó un esquema que muestra el comportamiento de las intensidades de la señal de la onda (eje z) en función de las velocidades (eje y) y profundidades (eje x), como se muestra en la Figura 7, en la cual se puede observar que el eco de las intensidades en la zona (A) para diferentes velocidades no sobrepasa los 3.5 cm . Por el contrario, el límite entre la zona (B) y la zona (C), presenta diferentes valores. Se observa que el pico “ficticio” de alta intensidad cambia de profundidad en función de la velocidad en forma lineal.

Este comportamiento se puede analizar mediante un ajuste lineal entre las velocidades y las profundidades donde se encuentran los picos “ficticios” que

marcan la transición de intensidad entre las zonas (B) y (C). En la Figura 8 se muestran los resultados de la regresión lineal indicada para el presente caso. Estos resultados se constituyen en una técnica para estimar la velocidad mínima necesaria para analizar una determinada profundidad.

6. CONCLUSIONES

La visualización de defectos internos dentro de una muestra de hormigón es un problema muy frecuente en la práctica de la industria de la construcción. El uso de dispositivos ultrasónicos de onda ha demostrado ser imprescindible para el estudio de las imágenes de hormigón. Pese al avance en la tecnología relacionada con estos dispositivos, aun no se comprende bien algunas de las tecnologías empleadas y, como consecuencia, los equipos de ultrasonido pueden ser mal utilizados y ser considerados como ineficaces. En el presente trabajo se realizó una breve revisión de las principales conceptos y características de los dispositivos ultrasónicos (ver Apéndice). Se elaboró un nuevo algoritmo que ayuda a identificar con mayor detalle, anomalías, huecos y espesor de la muestra sin la necesidad de un programa específico, es decir, que se pueda extraer y procesar los datos directamente del equipo. Para probar el algoritmo, se elaboró una muestra de hormigón regular, para la cual se realizaron las respectivas mediciones con el equipo de ultrasonido. Se compararon intensidades de la señal de la onda obtenidas con el programa PlaneVisor y con el algoritmo propuesto, siendo favorables los resultados de esta comparación. Como consecuencia, se realizaron medidas para diferentes velocidades. Un resultado importante es la relación entre la velocidad y la profundidad, la cual, permite disponer de una técnica para evaluar las velocidades mínimas necesarias para diferentes profundidades, dependiente del tipo de dosificación de la muestra. Es evidente que a medida que se desarrolla la tecnología relacionada con la tomografía ultrasónica, se pueden obtener mejores imágenes sobre las estructuras de hormigón, pero aún se tienen muchos aspectos por evaluar, entre ellos, el tipo de dosificación y clasificación de las muestras de hormigón.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses respecto a la publicación de este documento.

APÉNDICE

En esta sección, se mencionan algunos conceptos importantes para el funcionamiento del equipo de Pulso Eco.

A. MEDICIÓN DE IDA Y VUELTA DE LA ONDA

Para determinar la distancia (x) donde se produce el eco se utiliza la siguiente ecuación:

$$x = \frac{v\Delta t}{2}, \quad (\text{A1})$$

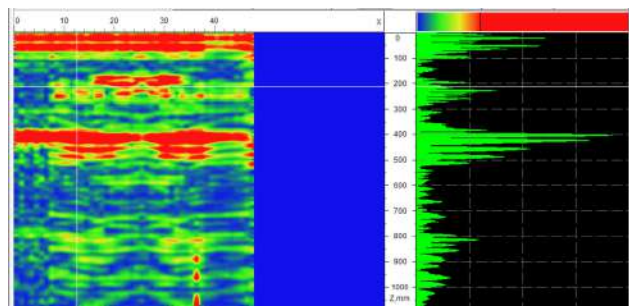


Fig. A1.— Pulso Eco. Fuente: Ejemplo del programa PlaneVisor.

donde v es la velocidad de la onda en el material y Δt es el tiempo de ida y vuelta de la onda.

En general, los equipos de ultrasonido necesitan de un programa con base en un algoritmo. Uno de los algoritmos más utilizados es el denominado como Técnica de Apertura Sintética de Enfoque (*SAFT* por sus siglas en inglés) (Tong et al. 2010), el cual es capaz de procesar la señal que optimiza el resultado de escaneo de área en el momento de localizar defectos o vacíos con el equipo de pulso *ECO* (Garg & Misra 2021). La Figura A1 muestra una imagen “scan B”, generada por el programa PlaneVisor, en la cual las zonas marcadas con color celeste corresponden al lugar donde no existen irregularidades, por lo que la señal se refleja casi en su totalidad. Por el contrario, si la coloración es rojiza indica que existen irregularidades que no permiten un total reflejo de la señal.

Para el proceso de escaneo se deben considerar ciertos aspectos que se describen a continuación.

A.1. Longitud de onda

Habitualmente los equipos de pulso *ECO* ultrasónico utilizan la frecuencia de 50 *kHz* (Hosseini et al. 2008; Snezhkov & Leonovich 2017) con el fin de evitar que las ondas reboten en el agregado del hormigón. Lo ideal es que el agregado tenga dimensiones menores a la longitud de onda, de esta forma el agregado no podrá aparecer en las imágenes de ultrasonido. La ecuación (A2) se utiliza para verificar que la longitud de onda media sea mayor que el tamaño máximo nominal del agregado (TM).

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{v}{2f} > TM, \quad (\text{A2})$$

donde λ es la longitud de onda, v es la velocidad de la onda en el material y f es la frecuencia.

A.2. Velocidad de onda del ultrasonido

Si el espesor de la muestra de hormigón no es conocido, se puede estimar el tiempo de viaje de la onda en función a su velocidad. La ecuación utilizada para calcular el tiempo de la llegada de la onda entre el transductor y el receptor está dada por:

$$t_{aa} = \sqrt{\frac{2d_{aa}^2 + x_{aa}^2}{v_s^2}}, \quad (\text{A3})$$

donde d_{aa} es el espesor del elemento, v_s es la velocidad de la onda en el hormigón, x_{aa} es la distancia

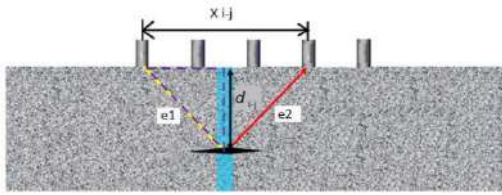


Fig. A2.— Esquema del funcionamiento del pulso *ECO* para determinar huecos. Fuente: Presentación “Stress-Wave Methods for Concrete Structures” (Sadri & Mirkhani 2009).

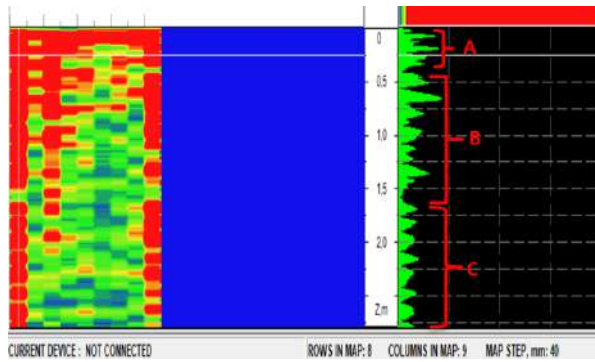


Fig. A3.— Pulso Eco. Fuente: Ejemplo del programa PlaneVisor.

entre los transductores emisor y receptor.

A.3. Obtención de discontinuidades

El algoritmo *SAFT* es capaz de realizar una composición de las señales obtenidas por cada par de transductores, lo cual permite detectar discontinuidades en la muestra de hormigón. La Figura A2 muestra un esquema del comportamiento de la señal de la onda cuando esta encuentra una discontinuidad; si no existiera la discontinuidad el equipo mide solo el espesor del elemento.

A.4. Compensación horizontal

Un equipo de pulso *ECO* genera una señal con componentes transversales y longitudinales, de igual manera que el receptor del equipo, recibe señales eco longitudinales y transversales. Lejos de las paredes, bajando a profundidades mayores, la principal contribución de señal de la onda del pulso eco es longitudinal. Cerca de las paredes la intensidad de las

ondas transversales es mayor, generando picos espurios, por lo cual es recomendable realizar medidas lejos de los bordes de la muestra. A mayores profundidades la intensidad del eco longitudinal disminuye por lo que las componentes transversales del eco contribuyen más a la señal de respuesta. Con todo lo mencionado anteriormente, lo recomendable es que el operador deba realizar el escaneo en las cercanías del centro de la muestra de hormigón.

A.5. Zona muerta, campo cercano y campo lejano

Debido a que las ondas de ultrasonido se generan en los puntos del plano de los transductores, la intensidad de la onda es afectada por fenómenos de interferencia entre dichos puntos. La interferencia genera una señal muy intensa en la zona cercana al cabezal. Este campo es conocido como zona muerta (A), donde es muy difícil poder detectar discontinuidades en el material debido a las señales espurias que se generan. El campo cercano (B), comienza desde la profundidad donde termina el pico de mayor intensidad de la zona muerta, hasta donde la intensidad de la señal se regula. Esta es la zona óptima para realizar medidas de las muestras. Debido a que la señal generada por el equipo es una onda mecánica, se sabe que esta se va disipando a medida que se propaga en el medio, hasta llegar a una región en la cual la onda no es capaz de generar un eco lo suficientemente intenso. A esta región se la conoce como la zona del campo lejano (C). Es importante mencionar que la distancia de propagación de la onda depende de la velocidad que el equipo le otorgue. Si la velocidad es baja, la transmisión de la señal de la onda es débil mientras que, para velocidades altas, esta transmisión de la señal de la onda es alta. Como se mencionó antes, los receptores del equipo reciben ecos longitudinales y transversales. Cuando el eco longitudinal es muy débil, la mayor contribución viene por parte del eco transversal, lo que el equipo interpreta como si fuese una irregularidad en la muestra, generando un pico ficticio que nos muestra el inicio del campo lejano. La figura A3 muestra las zonas mencionadas.

REFERENCIAS

- Anoni, L. G., Haach, V. G., & Khazanovich, L. 2024, *Construction and Building Materials*, 441
- De-La-Haza, A. O., Samokrutov, A. A., & Samokrutov, P. A. 2013, *Construction and Building Materials*, 38, 1276
- Garg, S. & Misra, S. 2021, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 36(4)
- Haach, V. G. & Ramirez, F. C. 2016, *Construction and Building Materials*, 119, 61
- Hosseini, Z., Momayez, M., Hassani, F., & Lévesque, D. 2008, *AIP Conf. Proc.*, 975, 1298
- Kim, D. S., Seo, W. S., & Lee, K. M. 2006, *NDT & E International*, 39(2), 143
- Lin, S. & Wang, Y. 2020, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(4)
- Malhotra, V. & Carino, N. J. 2003, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete* (Taylor & Francis Group)
- Sadri, A. & Mirkhani, K. 2009, *Engineering, Materials Science*
- Snezgkov, D. Y. & Leonovich, S. N. 2017, *Science & Technique*, 16(4)
- Tong, J., Chiu, C., & Wang, C. 2010, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 57(11)

REVISTA BOLIVIANA DE FÍSICA

COMITÉ EDITORIAL

Sociedad Boliviana de Física

Lic. Alfonso Velarde Chávez
Email: alfonso.velarde@gmail.com

Instituto de Investigaciones Físicas

Dr. Flavio Ghezzi Moris
Email: fghezzi@fiumsa.edu.bo
Dr. Wilfredo Tavera Llanos
Email: witavera@fiumsa.edu.bo

Carrera de Física

Dr. Armando R. Ticona Bustillos
Email: aticona@fiumsa.edu.bo

Casilla 8635, La Paz – Bolivia. Tel.: (591-2) 2792999, Fax: (591-2) 2792622

Misión

La Revista Boliviana de Física (RBF) es el órgano oficial de la Sociedad Boliviana de Física (SOBOFI) y se publica semestralmente en forma conjunta con el Instituto de Investigaciones Físicas y la Carrera de Física de la Universidad Mayor de San Andrés (IIF-UMSA).

La RBF busca difundir la producción científica de la comunidad de físicos y profesionales de ciencias afines, especialmente dentro de Iberoamérica.

Secciones

Los artículos, revisiones y colaboraciones se distribuyen en las siguientes secciones:

- A. **Artículos:** Son trabajos que presentan material nuevo y original. Para su publicación, deben ser revisados y aprobados por árbitros del Consejo Editorial. Los artículos deberán tener un resumen no mayor a 200 palabras y secciones de Introducción, Métodos y Procedimientos, Resultados y/o Discusión de datos, Conclusiones y Referencias.
- B. **Contribuciones y Revisiones:** Estos trabajos no presentan, necesariamente, material original sino que definen la posición del (de los) autor(es) sobre un determinado tópico de debate (en el caso de Contribuciones) o bien, son una revisión de temas conocidos en algún área de la física (en el caso de Revisiones). Las contribuciones deberán estar orientadas hacia la difusión de algún problema o debate interpretativo. Las revisiones estarán orientadas a exponer temas de trascendencia para el desarrollo de las ciencias relacionadas con la física, o exponer en forma didáctica algún tema que los autores encuentren que no ha sido tratado en forma adecuada en la literatura asequible en lengua castellana.
- C. **Memorias de la Reunión Anual de la SOBOFI u otras reuniones de física:** Esta sección reúne los resúmenes de los trabajos presentados durante la última Reunión Nacional Anual de la SOBOFI o de otras reuniones científicas importantes sobre física.
- D. **Enseñanza de la Física:** Esta sección está dedicada a artículos que tratan sobre problemas relacionados a la enseñanza de la física o a la promoción del estudio de la física entre los jóvenes estudiantes. Se incorporan regularmente en esta sección los exámenes de las Olimpiadas de Física y las Olimpiadas de Astronomía y Astrofísica. Las contribuciones a esta sección son seleccionadas exclusivamente por el Comité Editorial.
- E. **Historia:** Esta sección se dedica a la conmemoración de hechos importantes en la historia de la Física Boliviana e Iberoamericana. De igual manera, se orienta a la recopilación de publicaciones relacionadas a la física que, por su importancia histórica, merecen ser nuevamente publicadas.

Instrucciones para los autores

La Revista Boliviana de Física recibe trabajos escritos en castellano, inglés o portugués y deben contar con un resumen en castellano y su correspondiente traducción en inglés.

Los autores deberán enviar sus trabajos preferentemente en los formatos $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$, *MS Word*, o *sólo texto* (con extensiones *.tex*, *.doc* y *.txt*, respectivamente), ya sea mediante una copia en dispositivo magnético o bien por correo electrónico. En este caso, deberán incluir una carátula donde se especifique el título del trabajo, los nombres de los autores, las direcciones (postal y/o electrónica) y el resumen del trabajo. Además, las figuras, tablas y notas de pie de página contenidas deberán estar indicadas en el texto, debidamente numeradas y referenciadas. Las figuras deberán tener una resolución razonable a fin de que puedan ser vistas con suficiente claridad por el lector.

Los artículos científicos serán revisados por el Comité Editorial y posteriormente por un par de árbitros anónimos quienes dan el veredicto sobre si el artículo es aceptado o no.

La comunicación de los autores con los árbitros se realiza únicamente a través del editor encargado del área.

Los trabajos y consultas sobre la RBF deberán enviarse a las direcciones del Comité Editorial indicadas arriba.

Conflicto de interés: Los autores que envíen artículos para su publicación en la RBF admiten que no tienen conflicto de interés en relación a los trabajos realizados y presentados.

CONTENIDO

EDITORIAL	<i>Editor</i>	1
-----------	---------------	---

A. ARTÍCULOS

USO DE PERIODICIDADES EN LA DESCRIPCIÓN DE LA DINÁMICA Y SINCRONIZACIÓN EN UN SISTEMA TRANSMISOR RECEPTOR DE LÁSERES	<i>D. Polo-Alcoba & G. M. Ramírez-Ávila</i>	3
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD ELÉCTRICA POR UNIDAD DE LONGITUD CON FINES DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	<i>R. Suntura</i>	11
EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN UTILIZANDO EL EQUIPO EYECON DE ULTRASONIDO, MEDIANTE TÉCNICAS COMPUTACIONALES PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE LA IMAGEN SAFT	<i>Elba J. Colque-Zacarias & E. Palenque V.</i>	18