

Comunicador experimental privado basado en encriptamiento caótico

R. Nuñez

*Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones,
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada,
Km 107, carr. Tj.-Eda., Eda., B.C., México
e-mail: rnunez@cicese.mx*

Recibido el 14 de mayo de 2004; aceptado el 22 de septiembre de 2004

Para la implementación, caracterización y comprobación del circuito comunicador experimental privado basado en encriptamiento caótico (CEPBEC) que utiliza dos circuitos sincronizados de Lorenz fue necesario familiarizarse con la dinámica caótica de las señales X, Y y Z, y con un método explícito de sincronización. Se selecciona al parámetro de Rayleigh, de entre varios, puesto que es el más apropiado para describir el comportamiento caótico; se posiciona éste en un nivel tal que provoque el caos máximo en el circuito de Lorenz. También, se selecciona la señal Y como la de mayor dinámica caótica. Para ambas selecciones, se utilizan ampliamente las técnicas de PDS. En la evaluación del CEPBEC, se utilizan señales periódicas, caóticas, de voz y de audio, como información por ocultar, con la finalidad de averiguar: la calidad y confiabilidad en la recuperación; la cual resultó muy aceptable. Se escoge la señal X para sincronizar y las señales Y y Z -las de dinámica caótica más disímil- para establecer la comunicación bidireccional y comparar sus capacidades de ocultamiento y recuperación. Como resultado final, se establecen los criterios básicos que debe cumplir el circuito comunicador, respecto a las señales para sincronizar (v.gr., utilizar la medianamente caótica) y para establecer la comunicación bidireccional (v.gr., utilizar las caóticas más disímiles) segura y con un grado óptimo de ocultamiento. Se identifican las características relativas de amplitud y frecuencia que debe guardar la información por ocultar, en comparación a las de las señales caótica y de asincronía, para que la comunicación sea eficiente y confiable. En ese sentido, se propone la utilización de un circuito de control automático de ganancia que acondicione, relativamente, la magnitud y frecuencia de la información por ocultar.

Descriptores: Comunicación encriptada; sincronización de caos; circuitos de Lorenz.

An Encrypted Information Experimental Communicator (EIEC) is presented. It's realization is based on two Lorenz explicit synchronized circuits. All the chaotic dynamics of the circuits were studied and analysed using DSP techniques. Regarding to our real/time application, -on bidirectional audio communications field-, the optimum conclusion was to make the synchronization and the hidden information communication by the medium chaotic dynamic variable and by the most dissimilar chaotic dynamic variables, respectively. Through the complete characterization of the bidirectional channels, we got the minimum characteristics (*i.e.*, waveform and spectrum magnitude) of the private information that it must have just for to make a confidential and robust communication. The EIEC prototype, still doing well for academics and research purposes.

Keywords: Encrypted communication; chaos synchronized; Lorenz circuits.

PACS: 05.45.Vx; 05.45.Xt; 05.45.Gg

1. Introducción

Demostrar, experimentalmente, que la comunicación bidireccional de información oculta, utilizando los circuitos sincronizados de Lorenz (CSL's) no sólo es posible si no que es eficiente y confiable fue la meta cumplida en la Ref. 1. Partiendo de este resultado, el presente trabajo persigue caracterizar a un circuito comunicador experimental privado basado en encriptamiento caótico o CEPBEC, el cual aprovecha al máximo las características dinámicas de las variables en juego. Para ello, primero se describen el modelo y el circuito de lorenz (CL); enseguida, se realiza una caracterización completa de este último; rediseñado, implementado con menos componentes que el reportado en la Ref. 1 y haciéndolo trabajar en la banda de los kilohertz. Se averiguan, experimentalmente, los alcances dinámicos [2,3] (en el tiempo y en la frecuencia) de las señales X, Y y Z, en el régimen de operación estático y dinámico. Se conocen e identifican sus formas de onda y sus factores de forma espectral (FFE's). Se aplican técnicas de PDS [4,5] para averiguar que señal es la más

caótica, la más rápida, la del FFE más amplio, etc. También, se mide y despliega la dinámica (v.gr., régimen estático, periódico, caótico, periódico y estático) del CL, a través de la excitación impuesta por la variación lineal del parámetro de Rayleigh. Se selecciona éste, de entre varios, puesto que es el que mejor describe el comportamiento caótico y se posiciona en un valor tal que provoca un caos máximo en el CL [1]. Así, y bajo estas condiciones, se conoce el comportamiento relativo de la fase entre las señales y se averigua quiénes evolucionan al unísono, cómo se bifurcan, etc. Dados los objetivos que se persiguen, enmarcados por las aplicaciones en las comunicaciones privadas, se escoge de la Ref. 1, el método experimental para realizar la sincronía, entre dos CL's, en forma explícita [2,6,7]. Se detectan, experimentalmente, los aspectos por considerar para evitar la pérdida de la sincronía. Ya habiéndose familiarizado con la dinámica de las variables y con la sincronía explícita, se lleva a cabo la implementación, caracterización y comprobación experimental del CEPBEC [1,8,9]. Se construye con componentes electrónicos de bajo costo y de tolerancia mediana. Para su evaluación, se utilizan

señales periódicas, caóticas, de voz y de audio, -como información por ocultar-, con la finalidad de averiguar su calidad y confiabilidad de recuperación en comunicaciones: unidireccional y bidireccional. Se escoge la señal X, para sincronizar, y las señales Y y Z, (las de dinámica caótica más disímil) respectivamente, para establecer la comunicación bidireccional y comparar, instantáneamente, las capacidades de ocultamiento y recuperación que presentan éstas ante información idéntica (*v.gr.*, de autopueba) y diferente (*v.gr.*, un diálogo telefónico). Se construye una maqueta demostrativa del ocultamiento/envío y recepción/recuperación, en tiempo real, de la información de la radio, AM-escondida por la señal Y y FM-escondida por la señal Z, para observar en el osciloscopio y escuchar en bocinas las audioseñales: original y recuperada. Como resultado final, se establecen los criterios básicos que debe cumplir el comunicador. En particular, respecto a las señales que se utilizan para sincronizar (*v.gr.*, la de caos mediano) y establecer la comunicación bidireccional (*v.gr.*, las más caóticas) segura y con un grado óptimo de ocultamiento. Así como también, las características relativas de amplitud y frecuencia que debe guardar la información por ocultar, respecto a las de la señal caótica. Se plantea la necesidad de acondicionar la señal original por medio de un circuito de control automático de ganancia. Además, se proponen algunas aplicaciones de los CL's y del comunicador en procesos industriales, a través de sus analogías electromecánicas.

2. Modelo y circuito de Lorenz (CL)

Edward Lorenz [1] fue el primero en evidenciar la existencia del caos determinístico, *i.e.*, aquel que es desordenado e impredecible pero a su vez también es acotado, limitado o finito. El sistema que utilizó consta de tres ecuaciones diferenciales ordinarias que dedujo como una simplificación de las ecuaciones diferenciales parciales desarrolladas para modelar la convección térmica en la capa atmosférica inferior. A partir de la publicación del trabajo de Lorenz, su modelo ha sido uno de los más utilizados para probar las ideas relacionadas con la dinámica no lineal. Las ecuaciones del modelo son

$$\begin{aligned} \dot{x} &= r(y - x), \\ \dot{y} &= \mathbf{p}x - y - xz; \quad r, \mathbf{p}, b > 0, \\ \dot{z} &= -bz + xy, \end{aligned} \tag{1}$$

donde r es el número de Prandtl, \mathbf{p} es el de Rayleigh y b un factor geométrico. Con los valores paramétricos en: $r = 10$, $b = 8/3$ y $\mathbf{p} > 28$, el modelo de Lorenz presenta comportamiento en régimen caótico. Se llevan a la práctica las ecuaciones integrodiferenciales que describen el CL [1]. Las ecuaciones escaladas son

$$\begin{aligned} x &= -r \int (x - y) dt, \\ y &= - \left[10 \int x (z - \mathbf{p}/10) dt + \int y dt \right], \end{aligned} \tag{2}$$

$$z = - \left[10 \int y (-x) dt + b \int z dt \right],$$

donde los parámetros de r y b se dejan en 10 y 2.7, respectivamente. Mientras que el “ \mathbf{p} ”, se incorpora por medio de un voltaje que puede variarse a través de un potenciómetro (XR1) para obtener y mantener, confiablemente, el comportamiento del circuito en régimen de caos máximo; situación que se logra para valores en la vecindad de 3.90 V de c.d. [1]. El CL normalizado, construido y caracterizado es el que se presenta en la Fig. 1, y es una versión simplificada y escalada en la frecuencia del reportado en Núñez [1]. Para su implementación se utilizan sólo componentes comerciales de bajo costo, tolerancia mediana y fácil adquisición.

3. Caracterización experimental del CL

La medición, despliegue, análisis, salvaguarda e impresión de las señales, se basa extensamente en el sistema automático de prueba-Dadisp (SAP-Dadisp) [3].

3.1. Las variables de Lorenz y su dinámica caótica

En las Figs. 2 y 3 se presenta gráficamente los resultados de lo realizado para averiguar, experimentalmente, la dinámica

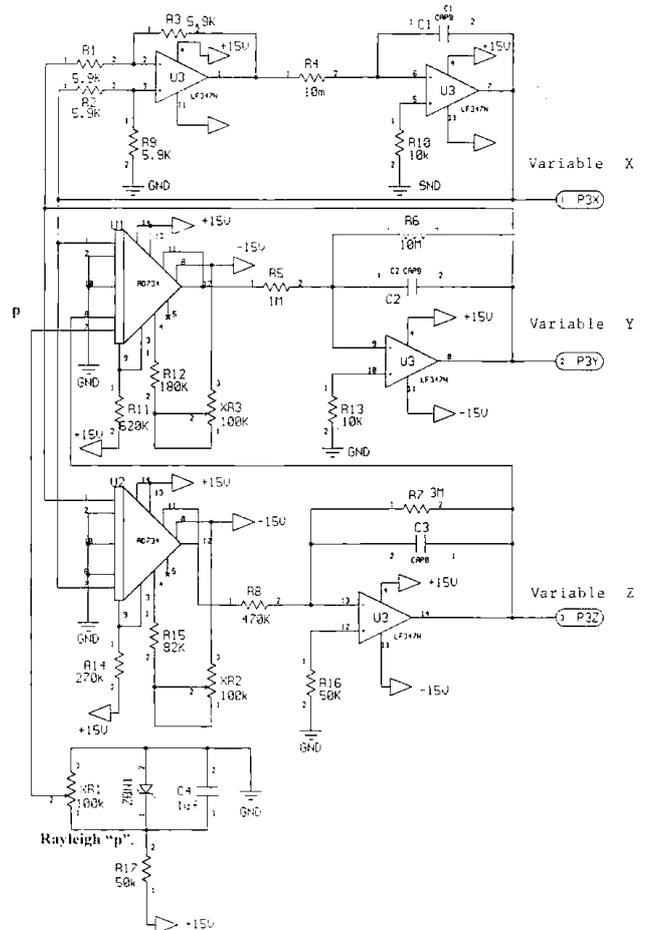


FIGURA 1. Circuito de Lorenz.

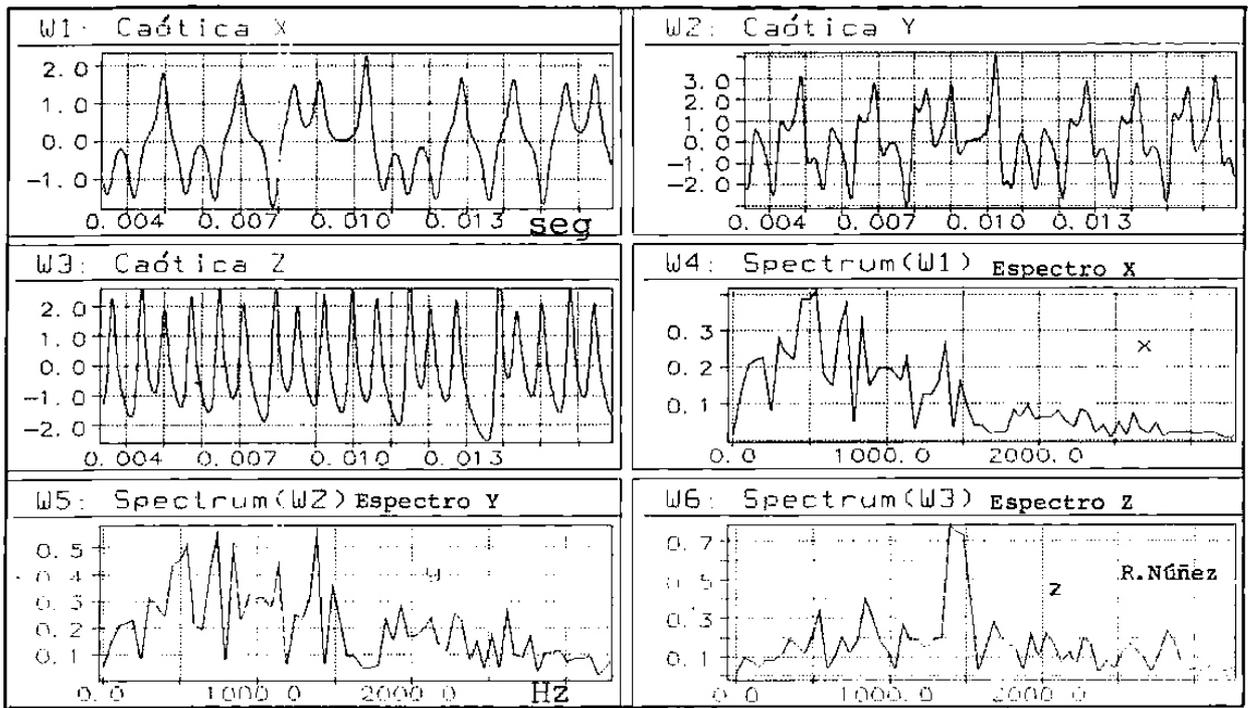


FIGURA 2. Señales caóticas X, Y, y Z, y sus espectros.

caótica de las tres señales de Lorenz. En particular, para identificar cualitativamente la más y la menos caótica. En la Fig. 2, se presentan las formas de onda instantáneas y la magnitud lineal de los espectros de las señales medidas: X, Y, y Z del CL, bajo régimen caótico máximo de operación (c.f., con la Sec. 2) y utilizando el SAP-Dadisp. Si observamos la forma de onda de las mismas, en las ventanas W1, W2 y W3 de la figura señalada, podemos corroborar que la señal Y presenta una mayor dinámica, le sigue la X y por último la Z. Esto mismo puede comprobarse revisando la magnitud y composición de su espectro, en las ventanas W4, W5 y W6. Pero, si deseamos cuantificar el grado relativo de caos entre ellas, necesitamos utilizar la función de autocorrelación [4]. Dicha función nos manifiesta, en el tiempo, qué tan parecida es a así misma una señal, *i.e.*, cuantas armónicas la constituyen. Por lo que para este caso y como lo indica la Fig. 3, la señal que presenta la autocorrelación de menor magnitud es la que registra la mayor dinámica caótica [1]. En la figura mencionada se despliegan las magnitudes de las autocorrelaciones instantáneas de las tres señales y se puede apreciar que la diferencia entre las magnitudes de las correspondientes a las señales X y Y es pequeña; lo que significa que sus dinámicas caóticas son parecidas, mas no iguales, puesto que la de la señal Y resulta ser un poco mayor. En la Fig. 4, se presentan las formas de onda (c.f., ventanas W1 y W3), los planos de fase (c.f., ventanas W5 y W6) y las magnitudes espectrales (c.f., ventanas W2 y W4) correspondientes a las señales X y Z del CL, operando en el régimen caótico mencionado. El plano de fase X/Z, se conoce como el atractor Mariposa de Lorenz (c.f., ventana W5) [1].

3.2. La dinámica del CL con base en la variación del parámetro de Rayleigh; bifurcación y fase relativa

En la Fig. 5, se presentan las características dinámicas del CL, en atención a la variación en forma lineal del parámetro de Rayleigh “p”. La variación inicia en 0.0 voltios y se incrementa linealmente hasta 6.0 voltios. Como puede apreciarse, la variación del parámetro provoca que el comportamiento del CL, -medido a través de sus señales X, Y y Z-, evolucione desde el régimen estático al dinámico (*v.gr.*, pasa por los estados periódico y caótico) y regrese de nuevo al estático. En particular, la figura mencionada describe gráficamente el comportamiento de la señal Y, la más caótica. En la Fig. 6, se despliega la “trayectoria al caos” que registran las señales Y y

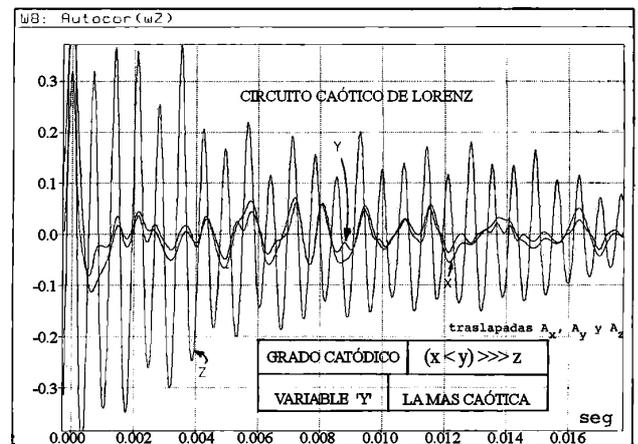


FIGURA 3. Comparativos entre las autocorrelaciones de X, Y, y Z.

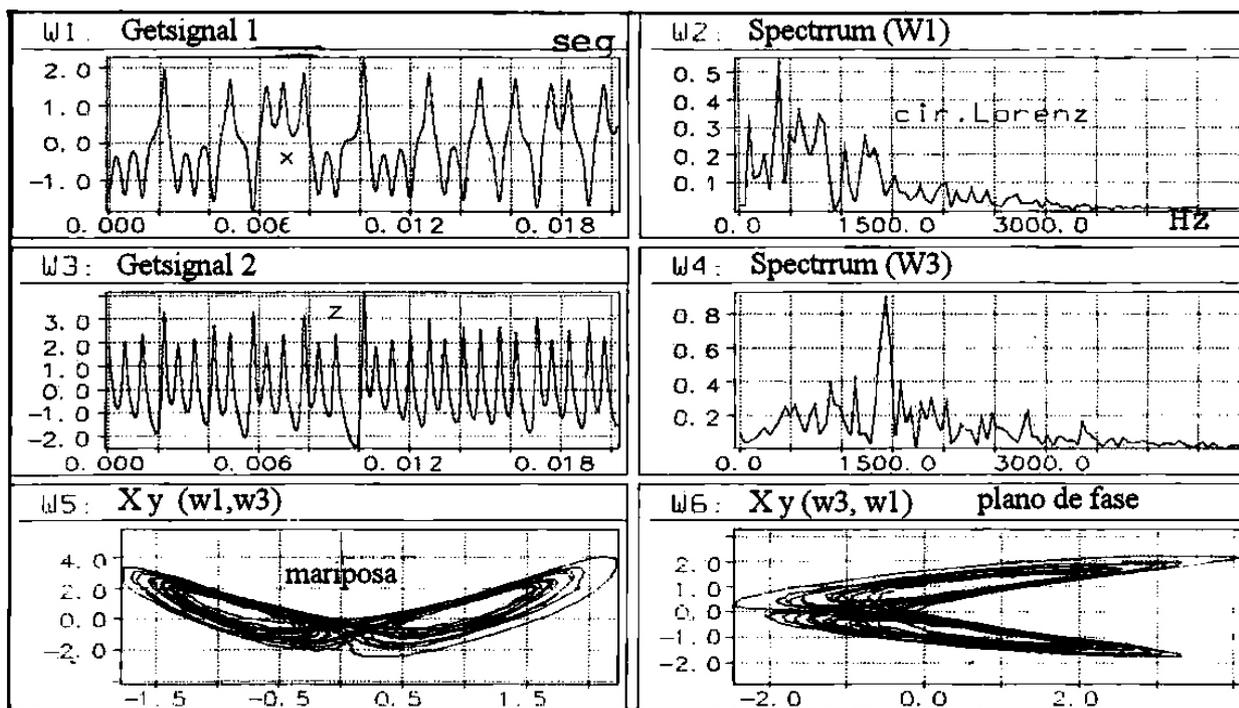


FIGURA 4. Formas de onda, espectros y planos de fase X/Z; mariposa de Lorenz.

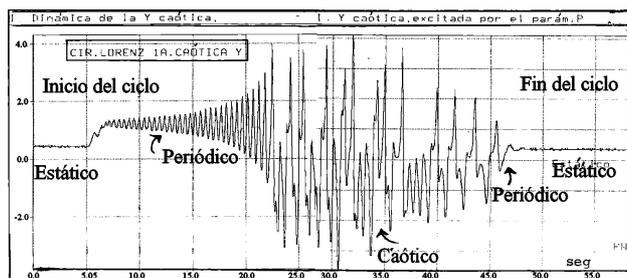


FIGURA 5. Dinámica completa de la señal Y del circuito de Lorenz.

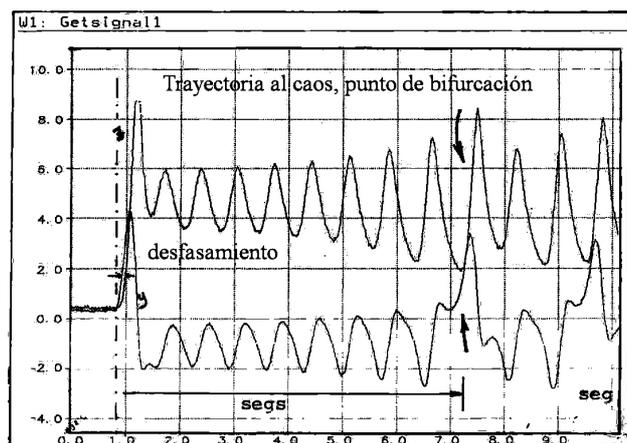


FIGURA 6. Trayectoria al caos y punto de bifurcación para Z y Y.

Z. Dicha trayectoria, manifiesta el fenómeno de bifurcación, el cual se presenta en la misma figura, *i.e.*, cuando la dinámica de las señales del circuito pasan del estado periódico al

caótico. Para el caso particular, el fenómeno se aprecia aproximadamente a los 6 segundos; medidos a partir del arranque de la función lineal de excitación (*i.e.*, de una de diente de sierra) que gobierna al parámetro. Aquí, podemos observar que la señal Y, además de ser la más caótica, adelanta en fase a las señales Z y X, y que éstas, a su vez, se posicionan y evolucionan en ese mismo orden.

4. Sincronización experimental en lazo abierto para dos CL's.

El método básico de sincronización experimental [6,7] que se utiliza es equivalente a uno de control en lazo abierto, como lo indica la Fig. 7. En dicho método, la señal X_r (*v.gr.*, la del circuito sincronizado o receptor) se genera y controla, indirectamente, a partir de la señal X_t (*v.gr.*, la del circuito sincronizador, o transmisor), *i.e.*, la X_t provoca que se generen las señales Y_r y Z_r (en el circuito receptor), que son las que a su vez producen la señal X_r , en el mismo circuito. Ahora bien, para que todo esto se dé sin contratiempos, se requiere que los dos CL's involucrados, *i.e.*, sus componentes, alimentaciones, parámetros, cadenas de retardos y condiciones iniciales de operación, etc., sean lo más parecido posible y que presenten la misma estabilidad. La diferencia que existe entre las señales caóticas X_t y X_r está relacionada, íntimamente, con la inestabilidad y desigualdad entre los circuitos. A esta diferencia la llamamos error en sincronía o asincronía. Dicha asincronía se gobierna por la misma dinámica caótica, puesto que manifiesta el movimiento relativo entre las fases y amplitudes de las señales en juego. Para que la asincronía

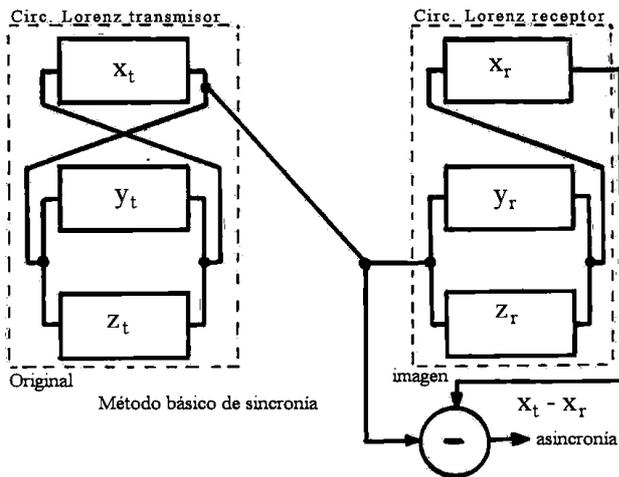


FIGURA 7. Método básico de sincronía para dos circuitos espejo de Lorenz.

sistemática sea mínima, se requiere que el retardo en la generación y control de la señal X_r sea el más pequeño posible. Como ya se pudo observar, para este método, la robustez resulta muy limitada y depende (como en cualquier sistema de control de lazo abierto) de la estabilidad de los componentes y circuitos electrónicos involucrados. En la Fig. 8, se presenta una descripción completa del proceso de sincronía para la señal X de Lorenz, utilizando el SAP-Dadisp [3]. En las ventanas W1 y W4 se despliegan las señales X_t y X_r , respectivamente, mientras que en las ventanas W7 y W8 se despliegan las magnitudes lineales de sus espectros. La ventana W6 presenta la calidad obtenida en el proceso de sincronía, *i.e.*, el plano de fase X_t/X_r . Dicho proceso también puede calificarse

por el error medido (*i.e.*, a la salida de un amplificador diferencial) o asincronía medida, que se presenta en la ventana W2 y, la cual, registra una magnitud máxima de 70 mVp. En la ventana W5 se presenta este mismo error, pero ahora calculado, *i.e.*, la diferencia entre las mediciones instantáneas de X_t y X_r , ventanas W1 y W4, respectivamente. Dicho error, de 75 mVp, concuerda con el medido directamente en el circuito y desplegado en la ventana W2. Para este mismo caso las magnitudes grandes de la función de correlación cruzada, [3,4], entre las señales X_t y X_r (*i.e.*, entre las ventanas W1 y W4), indican que las señales son muy parecidas, *i.e.*, se logra y mantiene una buena sincronización entre los dos CL; como también así lo indican sus espectros correspondientes.

5. Aplicaciones del método de sincronía explícita en comunicaciones

Las aplicaciones relacionadas con los sistemas de comunicación consisten en: ocultar-enviar y recibir-recuperar la información de interés, *i.e.*, son aplicaciones que tienen que ver con el establecimiento de una comunicación privada. Todo esto basado en la dinámica de las señales caóticas de los CL's. Se implementa y prueba, (experimentalmente) el método de sincronía de lazo abierto discutido en la Sec 4.

5.1. Envío de información encriptada.

En la Fig. 9 se presenta el esquema básico para llevar a cabo la comunicación unidireccional, o envío de mensajes ocultos, utilizando el método de sincronía explícita (*i.e.*, de dos

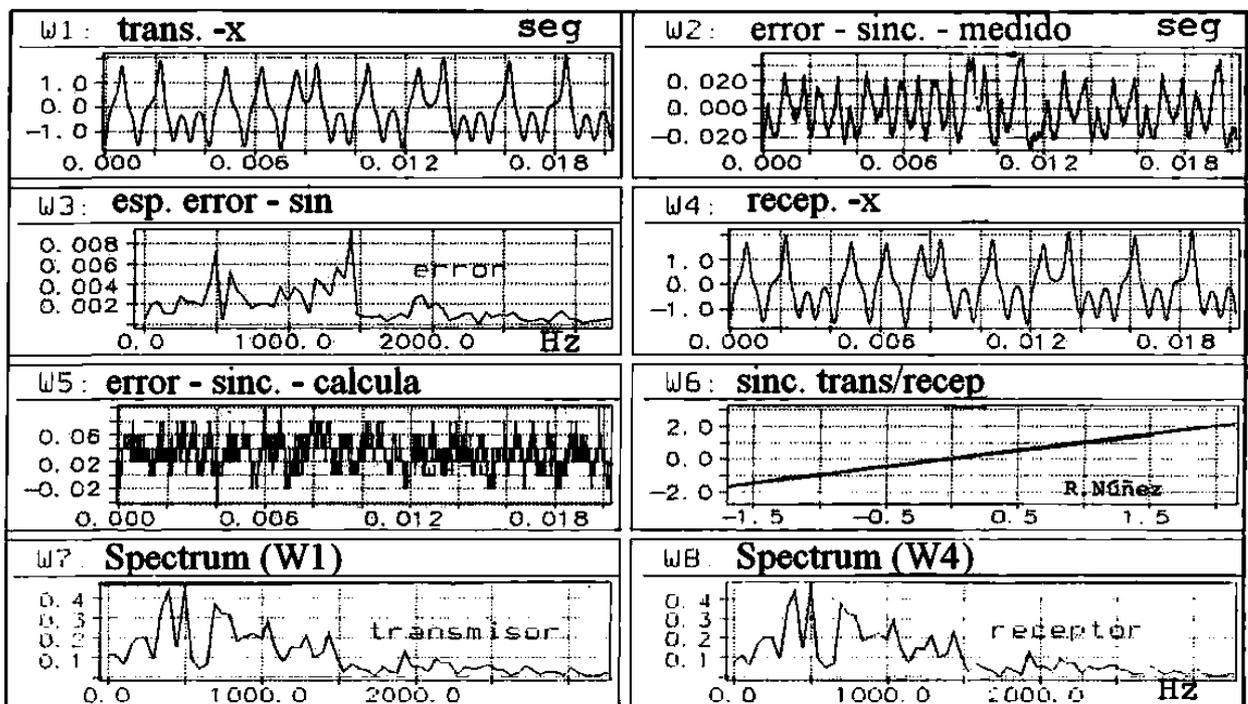


FIGURA 8. Procedimiento de sincronización para X; asincronías medidas.

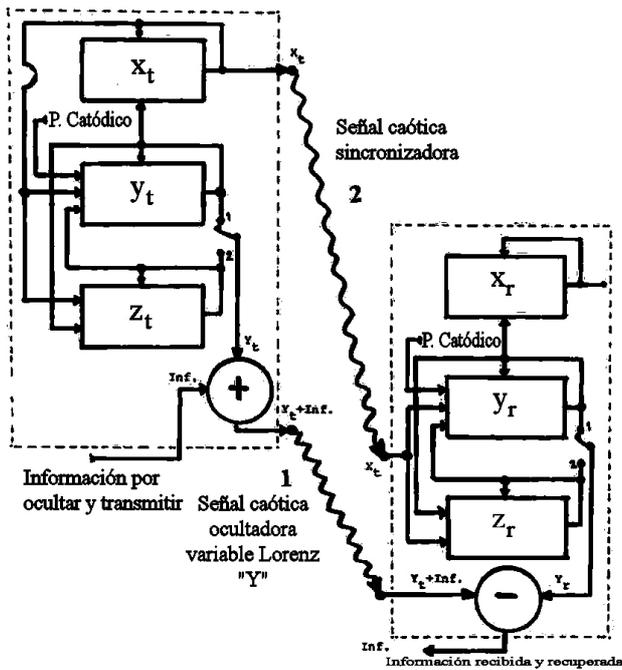


FIGURA 9. Esquema para comunicación de información oculta con sincronía explícita; Y_t o Z_t .

líneas) [6,7] y sincronizando por medio de la señal X . Dicho método, fue seleccionado de un estudio comparativo, sobre la eficiencia en el ocultamiento y recuperación de información, practicado a los métodos de sincronía implícita (*i.e.*, de una sola línea) y explícita, realizado en la Ref. 1. En la misma figura la señal caótica sincronizadora X_t viaja por la línea (2) y la información original por ocultar se mezcla, o suma, con

la señal caótica ocultadora, Y_t o Z_t , y ambas viajan por la línea (1). Ya en el receptor se sustrae de la señal mezclada la señal Y_r o Z_r , según sea el caso, la cual, (como producto de la sincronía) es casi idéntica a la Y_t o Z_t , para de esta manera recuperar la información original. De la Ref. 1, se sabe que para lograr un ocultamiento máximo de la señal original de información es más eficiente utilizar la señal más caótica Y , en comparación a otras opciones naturales, como es el caso al mezclar las tres señales caóticas X , Y y Z . En la Fig. 10, se presentan los resultados obtenidos cuando la señal por ocultar y recuperar es la señal caótica Z . En las ventanas $W1$ y $W2$ se despliegan la señal caótica X_r y el traslape entre ésta y la suma de las señales caóticas X_t y Z , respectivamente. En las ventanas $W3$ y $W4$ se presenta el plano de fase entre la señal caótica X_r y la señal mezclada (*i.e.*, la ocultadora X_t más la caótica Z), y la señal caótica Z recuperada, respectivamente. Para el caso, es interesante observar que el plano de fase, ventana $W3$, dibuja el atractor Mariposa de Lorenz.

5.2. Envío y recepción bidireccional de información encriptada

En la Fig. 11, se presenta el diagrama a cuadros del comunicador experimental privado basado en encriptamiento caótico, o CEPBEC que se construyó para comprobar que el proceso de ocultamiento y recuperación de voz/audio utilizando señales caóticas de Lorenz, con sincronización explícita, es factible y confiable [1]. Se utiliza un método de tres líneas para lograr la bidireccionalidad, y se seleccionan las señales para sincronizar y ocultar la información de una manera particular. La señal caótica X se emplea para sincronizar a los

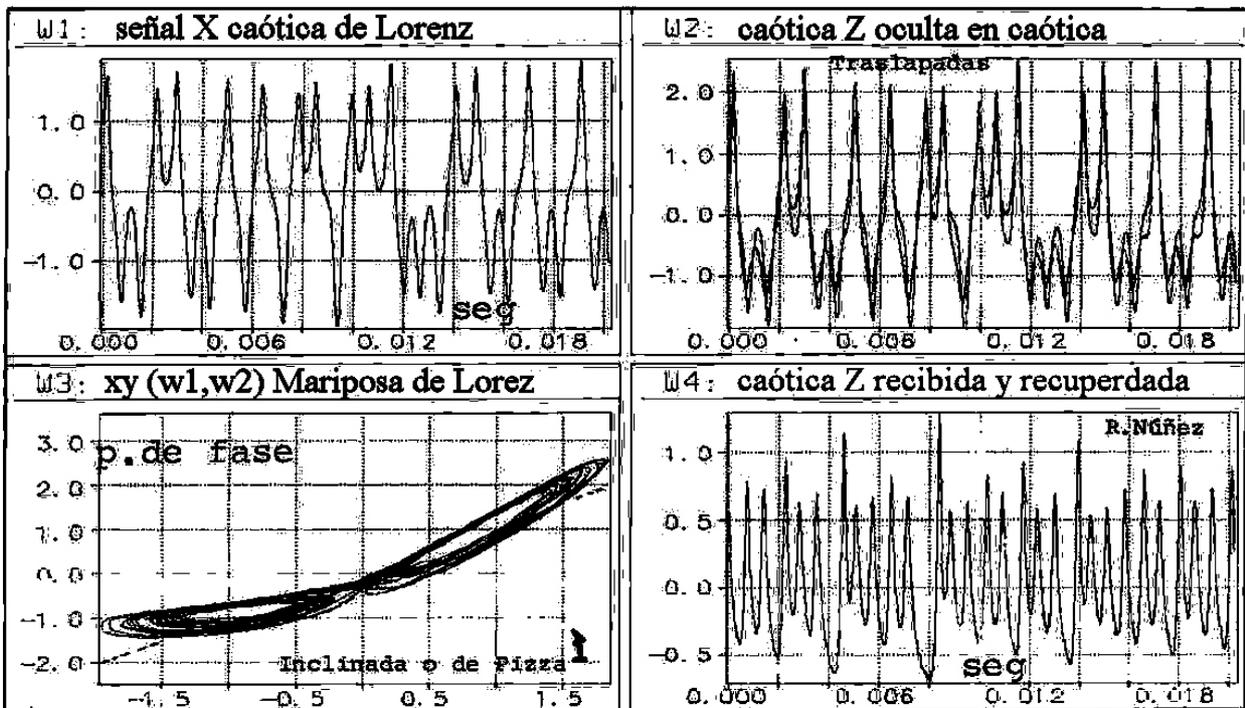


FIGURA 10. Señal caótica Z , por ocultarse y ya recuperada.

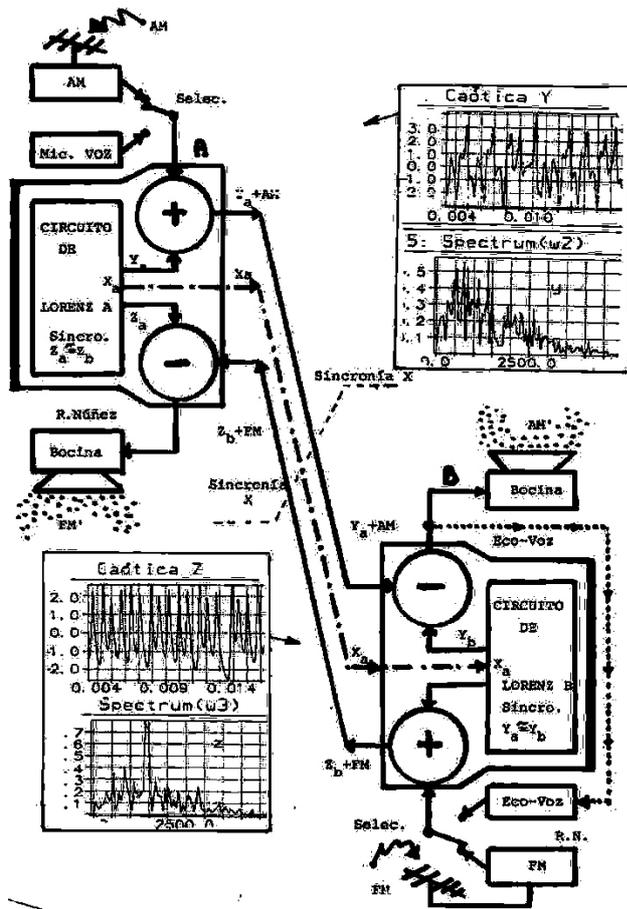


FIGURA 11. Diagrama de cuadros del CEPBEC; sincronía vía X.

dos CL, bajo condiciones casi idénticas de operación (c.f., con Sec. 4). Los circuitos se identifican como A y B. El A controla, o sincroniza, al B; las líneas que se indican son físicas (*i.e.*, alambres). El circuito A envía la información oculta a través de la señal de mayor dinámica caótica Y_a , al circuito B, y el circuito B contesta enviando la información oculta, a través de la señal de menor dinámica caótica Z_b , al circuito A. Se diseñó este esquema para estudiar las características de los canales, respecto a la capacidad y privacidad en el ocultamiento, *i.e.*, la capacidad de ocultar información de voz/audiot tanto de la misma magnitud y ancho de banda como de diferente magnitud y ancho de banda, a través de las señales de Lorenz con la dinámica caótica más disímil. Es obvio que se presentan dos niveles de eficiencia, o grados de confiabilidad, en la privacidad de la información comunicada ocultamente. El de A hacia B debe ser mucho mejor y, por lo tanto, más privado que el de B hacia A. En la Fig. 12 se presenta el circuito del CEPBEC que se implementó, probó y caracterizó.

5.2.1. Comportamiento del CEPBEC ante el "diálogo AM y FM"

Se utilizan de nuevo las Figs. 11 y 12 para describir una aplicación particular análoga a una conversación telefónica y que consiste en ocultar y enviar información de la radio AM del circuito A, a través de la señal Y_a , sincronizar al circuito B, por medio de la señal X_a , y recibir y recuperar dicha información de AM en el circuito B. Al mismo tiempo, el circuito

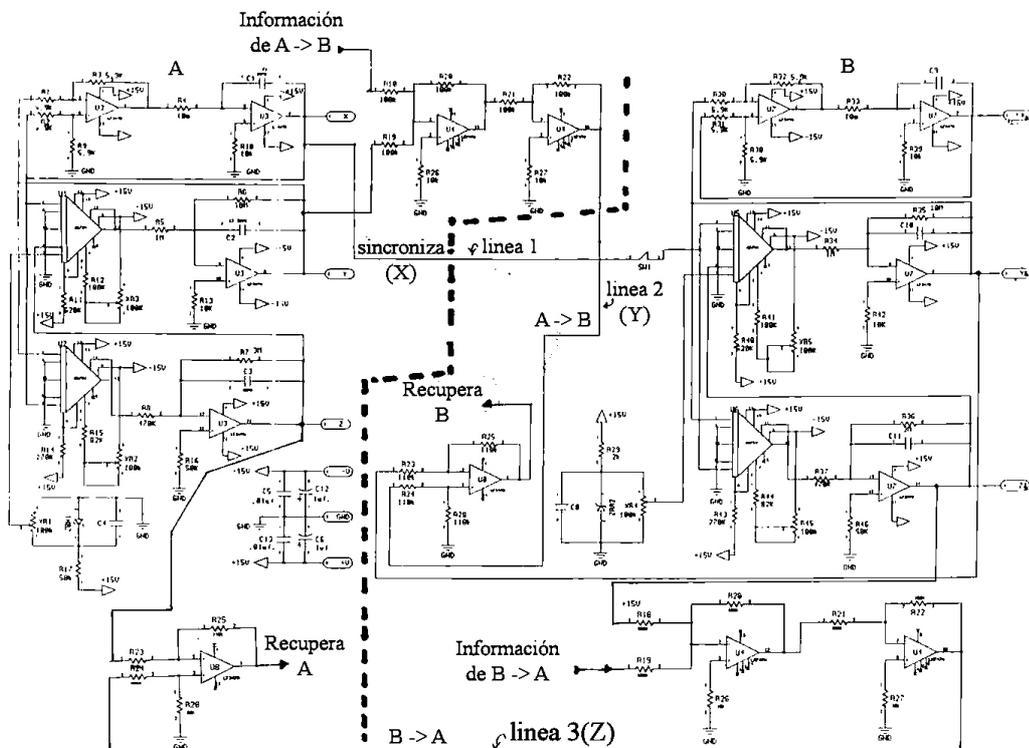


FIGURA 12. Diagrama del circuito del CEPBEC; sincronizado por X.

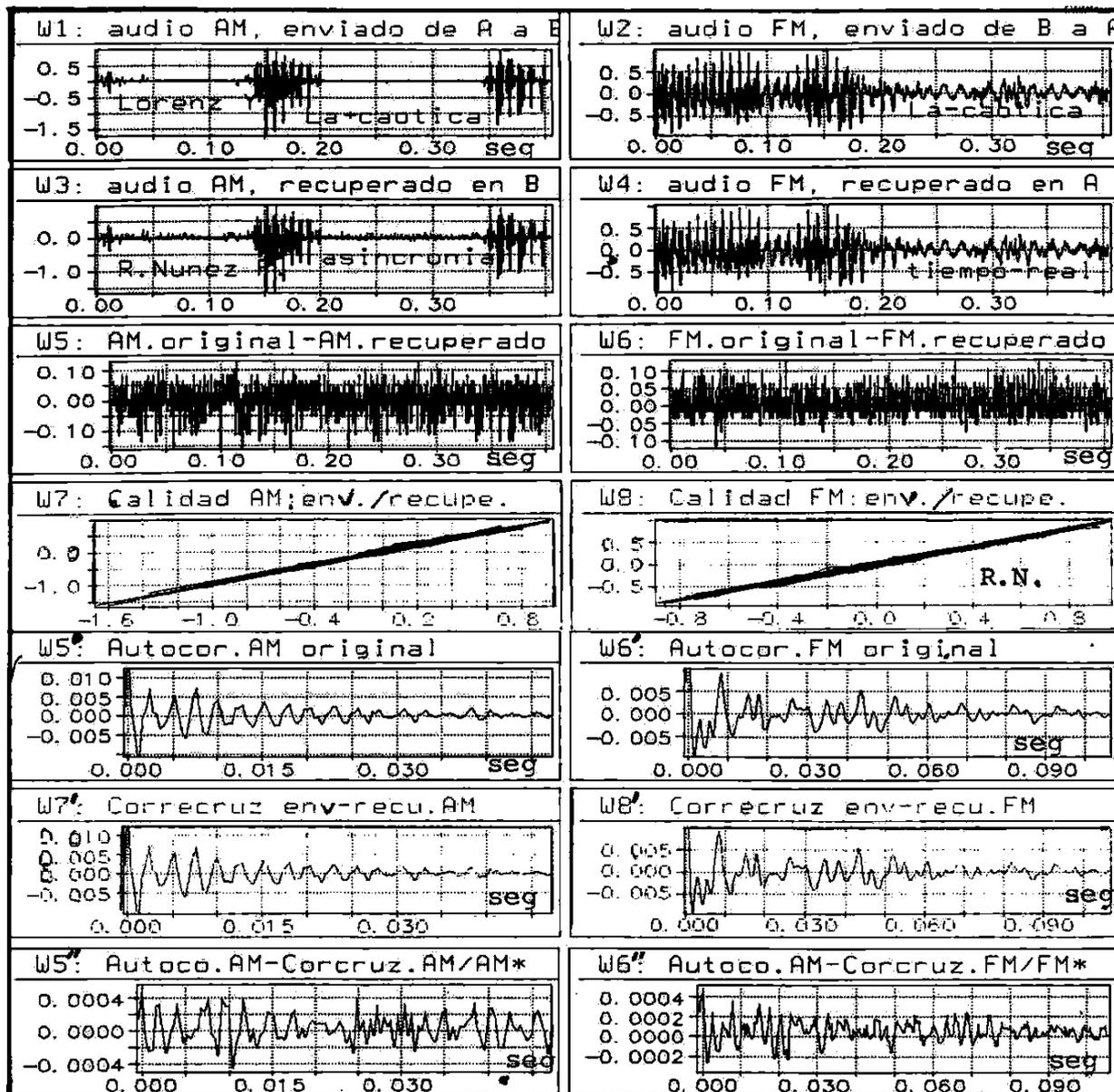


FIGURA 13. Procedimiento de ocultamiento y recuperación bidireccional de información privada del tipo audio AM y FM.

B oculta y envía al circuito A la información de la radio FM, a través de la señal Z_b . El circuito A recibirá y recuperará la información de FM. Como puede observarse, la información AM es la que viaja más protegida (o privada) puesto que utiliza, como medio de ocultamiento y transporte, a la señal Y_a , la más caótica. Mientras que, la información FM, es la que viaja menos protegida, puesto que su ancho de banda rebasa al de la señal Z_b , la menos caótica. En las ventanas W1 y W3, de la Fig. 13, se despliegan las señales de audio AM enviada de A hacia B y recuperada en B, respectivamente, y en las ventanas W2 y W4, se despliegan las señal de audio FM enviada de B hacia A y recuperada en A, respectivamente. Observe detenidamente las ventanas W3 y W4, correspondientes a las señales recuperadas, y compárelas con las ventanas W1 y W2, respectivamente, para que detecte los pe-

queños errores producto de la asincronía. En las ventanas W5 y W6, se presentan las diferencias entre las señales original u ocultada/enviada y recibida/recuperada para cada canal de comunicación (v.gr., AM y FM), respectivamente. Se puede observar que, para ambos casos, el error en la recuperación de la información es menor a 100 mVp. Aunque es conveniente aclarar que las señales originales de audio AM y FM, no están normalizadas en su amplitud. En las ventanas W7 y W8 se aprecia la tasa de calidad entre los audios transmitido y recibido para cada trayectoria de comunicación, en ambos sentidos y al mismo tiempo. Para verificar la calidad de cada canal [4,5], se obtiene la autocorrelación de la señal original y se compara con la correlación cruzada (CC) entre las señales original y recuperada. Si la señal recuperada es una copia exacta de la original su CC deberá corresponder a la auto-

correlación de la original. Lo anterior, se manifiesta a través de las ventanas: $W5'$, $W7'$ y $W5''$, en las cuales se presentan, la autocorrelación de la señal original AM, la CC entre la original y la recuperada, y la diferencia entre ambas correlaciones, respectivamente. Como puede apreciarse la diferencia entre las correlaciones es muy pequeña. En las ventanas $W6'$, $W8'$ y $W6''$, se presenta el caso para la comunicación FM. En especial, en la ventana $W6''$, en la cual se aprecia la diferencia entre las correlaciones y, como se ve, también ésta es muy pequeña y casi del orden de la correspondiente a la comunicación AM.

6. Conclusiones

Con base en el estudio de su dinámica se escogieron las señales de Lorenz para realizar la sincronía (*v.gr.*, la señal X_a) y la comunicación bidireccional (*v.gr.*, las señales Y_a y Z_b) de la información, en forma instantánea, con la idea de comparar las capacidades de ocultamiento y recuperación de "información idéntica", a través de las señales con la dinámicas caóticas mediana y más disímiles, respectivamente. Se caracterizaron los canales de ida y regreso, tanto en una configuración de autoprueba (*i.e.*, la misma información a través de diferentes señales de ocultamiento), como en otra del tipo conferencia telefónica (*i.e.*, entre dos interlocutores independientes, al mismo tiempo y con diferentes señales de ocultamiento). Se constató plenamente que la señal Y (la de dinámica más caótica) resulta ser la más eficiente y confiable en las labores de ocultamiento y recuperación, aún al compararse con otras opciones naturales de mezclado. Para calificar la calidad de los resultados del CEPBEC, se analizan la eficiencia y confiabilidad lograda en la recuperación de señales originales de información oculta de diversos tipos: periódicas, caóticas, de voz y de audio. En general, la calidad de los resultados obtenidos es buena, más sin embargo es posible optimizarlos, en especial, si se cuida que la información

por ocultar presente un factor de forma espectral (FFE) cuya magnitud sea al menos dos veces mayor que el de la asincronía y que sea menor, tantas veces como sea posible, al de la señal caótica ocultadora; esto asegura que el espectro por ocultar sea contenido, completamente, en el de la señal caótica. Esto se debe a que el espectro de las señales caóticas no es plano ni monótonico, sino más bien quebradizo, puesto que el número finito de armónicas que lo integran son excitadas no linealmente, provocando la presencia de niveles bajos en éste, los cuales pueden poner al descubierto componentes de frecuencia de la señal escondida. Es conveniente mencionar que la asincronía registrada en el proceso de sincronización es coherente con la dinámica caótica de las señales que la producen. Es por ello que, para las aplicaciones de comunicación privada, es necesario conocer las dinámicas caótica y periódica, en el tiempo y en la frecuencia, de la señal ocultadora y de la señal de información por ocultar, respectivamente. Para el caso de esta última, debe asegurarse que no viole el FFE establecido, para ello se propone acondicionar continuamente esta señal de información con circuitos de control automático de ganancia y ancho de banda, los cuales deben encargarse de mantener la amplitud (de la señal por ocultar) mayor que la de la asincronía y muy por debajo de la de la señal caótica ocultadora. A través de sus analogías electromecánicas, los CL's y el Comunicador implementado pueden aplicarse a procesos industriales de mezclado, lijado, desatorado, limpiado, etc. Estos procesos podrían ser de carácter continuo o intermitente, dependiendo del estado que guarde el parámetro de Rayleigh en cada uno de los CSL's.

Agradecimientos

Agradecemos al CONACYT por apoyar económicamente el presente, a través del proyecto 31874-1, dirigido por el Dr. Cesar Cruz Hernández.

1. R. Núñez P., "Implementación y Prueba de un Comunicador Caótico Bidireccional de Información Oculta, Basado en Dos Circuitos Sincronizados de Lorenz", Informe Técnico: CTETT20005, DET-CICESE (2000).
2. K.M. Cuomo, A.V. Oppenheim y S.H. Strogatz, *IEEE Trans. on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing* **40** No. 10 (1993).
3. R. Núñez P., "Los SAP's-Labview (Generador/ Analizador Dinámico) y Dadisp", Informe Técnico: CTETT9913, DET-CICESE (1998).
4. R. Núñez P., "Aplicaciones del PDS en la instrumentación moderna utilizando los programas: Dadisp y Labview", Notas de los cursos: PDS(ET535) y AIADS(ET631), DET-CICESE (1998).
5. A.V. Oppenheim, G.W. Wornell, S.H. Isabelle y K.M. Cuomo, *Proc. IEEE ICASSP IV* (1992) 117.
6. T.L. Carroll y L.M. Pecora, *IEEE Trans. on Circuits and Systems* **38** (1991) 453.
7. M. Hasler, *Circuits and Systems Tutorials*, C. Toumazou Ed. Piscataway, NJ: IEEE, (1994) 314.
8. N.J. Corron y D.W. Hahs, *IEEE Trans. Circuits Systems I* **44** (1997) 373.
9. O.A. Gonzales, G. Han, J. Pineda de G. y E. Sánchez S., *IEEE Trans. on Circuits and Systems-I* **47** (2000) 1243.