

ESTUDIO DINÁMICO EN CIRCUITOS CAÓTICOS MEDIANTE EXPERIMENTOS SIMULADOS, NUMÉRICOS Y FÍSICOS

A. ALEJANDRO S. CORO[†]

[†] Carrera de física
Facultad de ciencias puras y naturales
Universidad Mayor de San Andrés
La Paz - Bolivia

RESUMEN

Se realizó un estudio dinámico mediante experimentos simulados, numéricos y físicos, de un circuito caótico modificado propuesto tipo Chua. Comparamos cualitativamente los resultados con una vasta galería atractores y, para un caso, se verifican sus comportamientos dinámicos cuantitativamente mediante los exponentes de Lyapunov y el parámetro d-infinito. Estos resultados están en concordancia con el trabajo de Conde-Ramírez(2007) y Gallas-Ramírez(2008), solo que aquí, se enfoca sobre todo en la influencia de valores elevados en la resistencia interna del inductor el circuito de Chua y como puede ser solventada con una modificación que, de cierta manera, introduce histéresis.

Descriptores: Caos determinista - circuitos caóticos - histéresis - exponentes de Lyapunov - tiempo de simulado en regiones transitorias y asintóticamente estables.

Código(s) PACS: 05.45._a, 05.45.Xt

ABSTRACT

A dynamical study was carried out by simulations and physical experiments, of a proposed modified chaotic circuit of the Chua type. We qualitatively compare the results with a vast attractor gallery and, for one case, we verify quantitatively by means of the Lyapunov exponents and the d-infinite parameter. These results are in agreement with the work of Conde-Ramírez(2007) and Gallas-Ramírez(2008). Additionally we proceed to experimentally couple two of these circuits and only the gallery is shown.

Subject headings: Deterministic chaos - chaotic circuits - hysteresis - Lyapunov exponents - transient and asymptotically stable regions.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de circuitos caóticos es muy importante no sólo para comprender la naturaleza del caos, sino también para desarrollar aplicaciones sofisticadas que utilicen realmente este comportamiento. En vista de la emocionante aparición de la nanotecnología, encriptación de información basada en el caos y el atractivo futuro de la computación cuántica, los circuitos no lineales se han vuelto aún más importantes y fundamentales. Esto requiere una investigación exhaustiva de las características dinámicas y los mayores regímenes de supervisión posibles de circuitos y sistemas no lineales.

1.1. Circuito de Chua clásico y modificado

El circuito de Chua (CC), se muestra en la Fig. ??, es uno de los modelos más populares que exhiben caos puesto que es el circuito autónomo más simple capaz de mostrar comportamiento caótico. Está compuesto por una parte que presenta un comportamiento típico de un oscilador amortiguado (dos

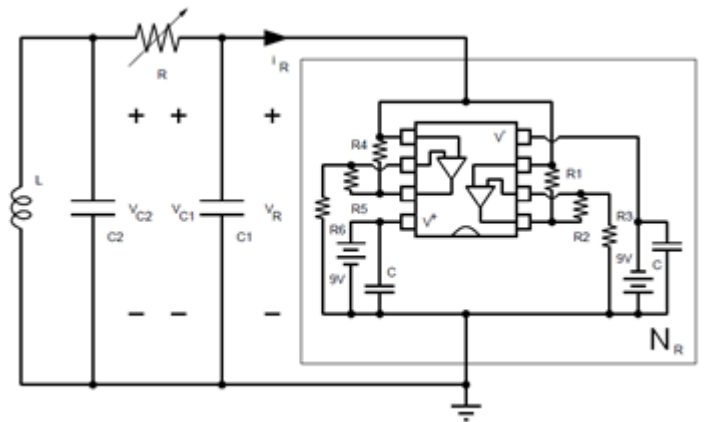


FIG. 1.— Circuito de Chua utilizando dos amplificadores operacionales (op amps) y seis resistencias lineales que están disponibles en un único circuito integrado de ocho pines (TL082), que forma el diodo de Chua N_R implementado por Kennedy (1992).

condensadores C_1 y C_2 , una resistencia variable R y una bobina L) y la otra parte que constituye el único elemento no lineal denominado diodo de Chua N_R

[†]Email: asuxoc@fcpn.edu.bo.

que básicamente es una resistencia no lineal o lineal por partes (Piecewise linear o PWL) como se muestra en la Fig ???. Este elemento causante de la no linealidad actúa como la fuente de energía de todo el circuito, se ocupa de retroalimentarlo y lo mantiene oscilando.

Escribiendo las variables dinámicas V_{C1} , V_{C2} e I_L , junto con los voltajes de quiebre $-B_p$ y $+B_p$, como:

$$\begin{aligned} x &= V_{C1}/B_p, \\ y &= V_{C2}/B_p, \\ z &= RI_L/B_p, \\ \tau &= t/RC_2 \end{aligned} \quad (1)$$

se obtiene las ecuaciones diferenciales adimensionales del CC:

$$\begin{aligned} dx/d\tau &= \alpha(y - x - f(x)) \\ dy/d\tau &= x - y + z \\ dz/d\tau &= -\beta y - \gamma z \end{aligned} \quad (2)$$

y

$$\begin{aligned} \alpha &= C_2/C_3 \\ \beta &= R^2 C_2/L \\ \gamma &= r_0 RC_2/L \end{aligned} \quad (3)$$

Donde se añadió la resistencia lineal r_0 en serie con el inductor en el esquemático de la Fig.??, esto se conoce como el circuito de Chua canónico (CCC) en el sentido de que puede exhibir todos los posibles fenómenos dinámicos asociados con cualquier vector de campo continuo lineal a trozos simétrico de tres regiones. En el caso que no se considera la resistencia r_0 , el valor de γ es nulo y el circuito se convierte en el caso simple/ideal donde no se considera resistencia interna en el inductor. La función PWL que describe el comportamiento del diodo de Chua, es:

$$f(x) = m_0 x + 1/2(m_1 - m_0)(|x + B_p| - |x - B_p|) \quad (4)$$

y las pendientes se pueden escribir como:

$$m_0 = R(-1/R_3 + 1/R_4) \quad (5)$$

$$m_1 = R(-1/R_3 - 1/R_6) \quad (6)$$

m_1 y m_2 son las pendientes negativas de la Fig.??.

Después del advenimiento del circuito caótico de Chua, se han reportado numerosos trabajos sobre diferentes esquemas de realización de este circuito. Pues, es atractivo buscar un circuito de Chua actualizado que tenga comportamientos dinámicos similares al circuito clásico de Chua, pero que posea una estructura topológica de circuito mucho más simple (si se puede con un comportamiento dinámico más complejo) y sea mucho más fácil de implementar en la práctica. Todas estas realizaciones se centran principalmente en dos propósitos: realización sin inductor del circuito de Chua y realización del diodo de Chua basada en componentes electrónicos listos para usar. Generalmente, la razón detrás de la realización sin inductor radica en el hecho de que la presencia de un inductor de bobinado manual con resistencia

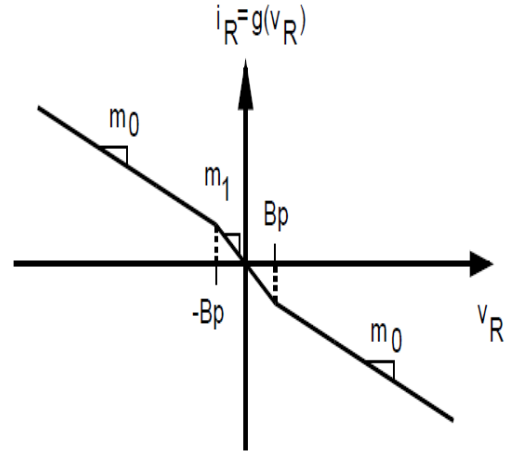


FIG. 2.— Relación Corriente Voltaje del Diodo de Chua. $-B_p$ y $+B_p$ son los puntos de quiebre de la relación corriente voltaje del diodo de Chua, mientras que m_0 y m_1 son las pendientes de la región externa e interna, respectivamente.

parásita hace inadecuado el diseño de circuitos integrados y en muchas ocasiones no se pueda implementar. He aquí, donde nuestra propuesta entra en acción. En 1990, Murali y Lakshmanan exploraron el circuito de Chua autónomo con una excitación externa periódica que convierte al circuito en no autónomo. Observaron una inmensa variedad de secuencias de bifurcaciones, histéresis y la coexistencia de múltiples atractores. Pero, sin modificar el diodo de Chua. Lindberg en 1992, en base al trabajo de Murali y Lakshmanan realizó una explicación sencilla del comportamiento físico del circuito y verificó mediante simulación algunas de las conclusiones de Murali y Lakshmanan, pues las imágenes y demás detalles reportados no están muy claros. Por un lado, el circuito de Chua, a pesar de su simplicidad, permite observar muchos comportamientos dinámicos tomando una característica lineal por partes; posteriormente, también se desarrolló una versión aproximada con una no linealidad cubica. Por otro lado, Makoto y Chua (2004) generaron osciladores no lineales histeréticos con diodos de Chua, i.e., utilizaron distintas configuraciones en circuitos con el diodo de Chua (sin modificarlo) junto con otros componentes electrónicos (capacitores, inductores, etc.) y producían fenómenos de histéresis. Dicho estudio, surgió debido a que en otros circuitos caóticos utilizaron la histéresis como elemento no lineal, como el circuito de Saito (1990). Flores (2008) asevera: "A diferencia del circuito de Chua, el circuito de Saito no ha tenido la suficiente atención que requiere, pero no hay duda de que en los próximos años sea uno de los circuitos más estudiados, ya que este circuito presenta un comportamiento hipercaótico." La no linealidad de la histéresis es ampliamente exhibida en una variedad de materiales y sistemas. Thompson y Steward definen el fenómeno de histéresis como: "El fenómeno, generado por una bifurcación catastrófica-peligrosa, en el que una trayectoria atractora no

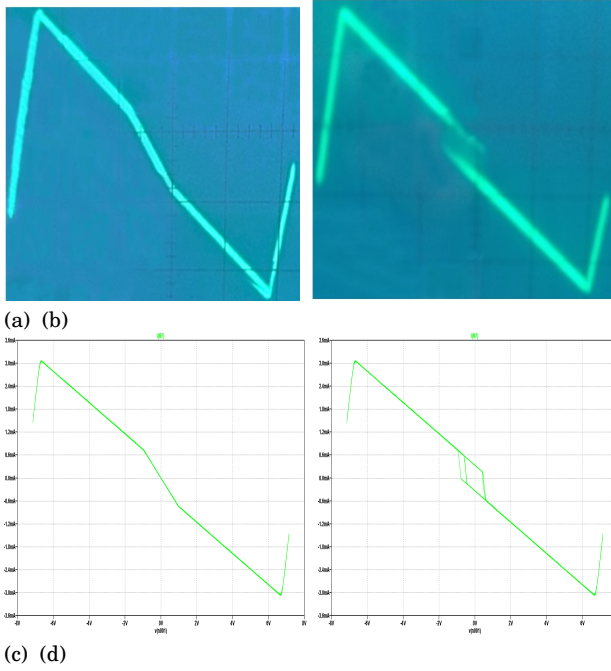


FIG. 3.— Comportamiento no lineal del diodo de Chua y su modificación: en osciloscopio (a) PWL y (b) PWL con histeresis en la parte central. En simulaciones: (c) PWL y (d) PWL con histeresis en la parte central.

se restablece (inmediatamente) al invertirse el barrido de control. Dos bifurcaciones de este tipo suelen generar un bucle de histéresis, que se observa, por ejemplo, durante los barridos de frecuencia a través de la resonancia no lineal.”

Aquí se propone una modificación del CCC que lleva a ver un fenómeno de histeresis asociado al comportamiento no lineal del diodo de Chua.

En el presente trabajo, en la sección (2) utilizando resistencias internas elevadas del inductor se propone una modificación del CCC, que de una manera simple, introduce histéresis. Se realiza una comparación cualitativa de los comportamientos obtenidos para el CCC con resistencias elevadas y con la modificación propuesta, realizando simulaciones con el software de circuitos eléctricos LTSpice XVII.

En la sección (3) se compara los resultados de la simulación del CCC con resistencias elevadas con resultados numéricos de las ecuaciones del CCC bajo los mismos valores de los componentes electrónicos. También, se caracterizan algunos comportamientos utilizando los exponentes de Lyapunov y el parámetro d-infinito. Para este caso numérico se utiliza una aproximación cubica para la función PWL como se hace en el trabajo de Gallas-Rámirez. Y en la sección (4) se muestran los comportamientos dinámicos obtenidos de experimentos físicos del circuito con el CCC modificado.

Adicionalmente procedemos a acoplar experimentalmente dos CCC modificados y solo se muestra la galería de atractores en la sección de anexos.

2. CCC MODIFICADO

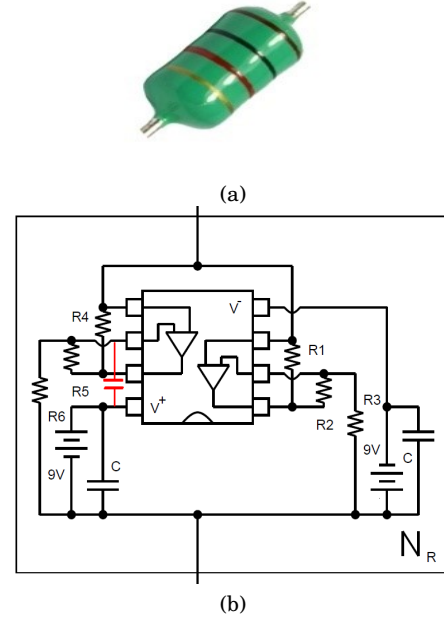


FIG. 4.— (a) Esquemático del diodo de Chua modificado con un condensador cerámico en los terminales 6 y 8 (color rojo) del circuito integrado TL082. (b) Inductor moldeado, de fácil adquisición.

Para ver una nueva dinámica o identificar mejor la dinámica oculta del circuito de Chua, es significativo diseñar un diodo de Chua lineal por partes con los segmentos deseados, Wang et. al. (2019) utilizaron un diodo lineal a trozos de 5 segmentos para ver nuevos atractores y Medrano et. al. (2004) utilizaron un diodo de Chua modificado para identificar atractores ocultos y atractores coexistentes. En estos y muchos otros trabajos se puede ver que varios autores modifican dicho circuito de alguna manera según las necesidades requeridas.

La propuesta del CCC modificado (C^3M), se realiza utilizando un inductor de elevada resistencia interna parásita (Fig. ??(a)) y alterando el funcionamiento del diodo de Chua, i.e., sin los condensadores C de derivación conectados a cada batería de 9V, cuyo propósito es mantener las fuentes de alimentación con una tensión continua, y con la adición de un capacitor en las terminales 6 y 8 del circuito integrado (que esta en color rojo) en la Fig. ??(b).

Realizando estas modificaciones el diodo de Chua ya no es lineal en la parte central y se convierte en un bucle de histeresis. El comportamiento lineal a tramos del diodo de Chua se muestra en la Fig. ??(a), el comportamiento del diodo de Chua modificado con una “histéresis” en la parte central se muestra en la Fig. ??(b).

Recalcando nuevamente que, esta modificación sirve para que ¡el CCC pueda funcionar! con una resistencia parásita interna elevada del inductor, superior a 30 (Ω) según el criterio de Siderskiy. La mayoría de CCC no funciona con este tipo de inductores, ya que están diseñados con inductores de resistencia parásitas interna bajas, despreciables o ideales.

Los circuitos con amplificadores operacionales (Op

TABLA 1
LISTA DE COMPONENTES UTILIZADOS.

Elemento	Descripción	Valor	Tolerancia
L	Inductor moldeado	18mH	+10 %
C ₁	Condensador cerámico E 103H	10 nF	+3 %
C ₂	Condensador cerámico 104	100nF	+3 %
A	Op amp (TL082)		
R ₁	Resistencia	220	+5 %
R ₂	Resistencia	220	+5 %
R ₃	Resistencia	2.2 k	+5 %
R ₄	Resistencia	22 k	+5 %
R ₅	Resistencia	22 k	+5 %
R ₆	Resistencia	3.3 k	+5 %
R	Potenciómetro	2 k	

amp) tienden a ser muy afilados y evitan eficazmente la histéresis mientras se realiza una operación específica. Existen muchos circuitos de cargadores de batería basados en Op amp, en los que la ausencia de histéresis en realidad se convierte en una desventaja y tenemos que forzar la histéresis agregando una resistencia de retroalimentación a través de la salida y uno de los pines de entrada del Op amp para habilitar el efecto de histéresis. Por lo tanto, la histéresis en circuitos electrónicos puede ser a veces beneficiosa y a veces una desventaja dependiendo de las especificaciones de aplicación del circuito. En nuestro caso es beneficiosa porque solventa el hecho de utilizar inductores ideales con una resistencia interna parásita despreciable, cosa que requiere mayor trabajo experimental. En nuestro caso el inductor usado tiene una elevada resistencia interna parásita que es de fácil acceso y con la respectiva se puede construir el circuito de Chua con mayor rapidez y facilidad, pero con algunas desventajas en cuanto a su comportamiento dinámico que se señalan mas adelante.

3. SIMULACIONES

Utilizando los valores de los componentes electrónicos de la Tabla ?? se realiza la simulación del circuito en el software LTSpice XVII. Se muestra los distintos comportamientos dinámicos usando r_0 como parámetro de control para: (a) el CCC, (b) el CCC modificado. Y posteriormente, con r_0 fijo y usando R como parámetro de control para: (c) el CCC y (d) CCC modificado.

La primera columna de la Tabla ?? muestra imágenes de los atractores generados por el circuito simulado; la segunda columna proporciona sus series temporales; la tercera columna da el resultado de una Transformada Rápida de Fourier (FFT) sobre las series temporales. Cada gráfica dentro las tablas esta con una numeración, que indica el orden en el que fueron simuladas. La Tabla ?? proporciona, los valores r_0 usados, el tiempo estimado del régimen transitorio t_{rt} y el tiempo de simulación utilizado que abarca el régimen estable t_{re} . En la Fig. ??, se muestra el tiempo estimado del régimen transitorio para cada valor r_0 de la Tabla ?? . Aquí sólo se puede presentar una pequeña muestra de la variedad de comportamientos caóticos que se observa y por eso no se muestran todos los comportamientos correspondientes a cada valor de la Tabla ??, solo

se presentan aquellos comportamientos que tienen un cambio cualitativo observable mas significativo. En la Tabla ?? se muestra como va cambiando el comportamiento del CCC a medida que r_0 aumenta. Se uso 0.01 ms para el paso de tiempo máximo y los tiempos de simulado fueron cambiando, se utilizo distintos intervalos de tiempo para el régimen transitorio y el régimen estable. Esto se logro, observando las series temporales de la corriente a través del inductor (aproximados a simple vista). Esto disminuye enormemente la potencia computacional requerida al evitar colocar tiempos de simulación muy largos, para asegurarnos de pasar la región transitoria, pero, se debe tener mucho cuidado porque estas series temporales pueden aparentar estar en la región asintóticamente estable, cuando en realidad en tiempos mucho mayores algunas series temporales cambian o tienen un "hueco" a partir del cual, empieza "otra región estable" y esto se manifiesta, por ejemplo, como una reflexión del atractor 1-scroll, como se muestra en las gráficas de la Tabla ??, en (6a) se utilizo solo el tiempo transitorio, en (6b) se utilizo solo la primera región estable, que se ve en la serie temporal (5), y en (6c) se utilizo el tiempo de simulación que este en la segunda región estable (desechando la región transitoria y la primera región estable). La serie temporal (7b) muestra la transición del régimen transitorio al primer régimen estable y (7a) muestra la transición del primer régimen estable al segundo régimen estable. En la Tabla ?? se muestran los comportamientos obtenidos para el CCC modificado, aquí se presentan varios ciclos limites(1)-(4) hasta que aparecen comportamientos caóticos double-scroll (5)-(7). En la Tabla ?? se muestra los comportamientos fijando $r_0 = 56(\Omega)$ y variando R en el CCC. Aquí se ve que para valores elevados de la resistencia interna del inductor, no se manifiestan comportamientos caóticos. En la Tabla ??e ve el amplio comportamiento que el CCC modificado tiene, con la misma resistencia interna r_0 que en el caso de CCC de la Tabla y bajo el mismo intervalo de valores de R.

TABLA 2
VALORES DE r_0 , EL TIEMPO DEL RÉGIMEN TRANSITORIO t_{rt} , EL TIEMPO DE LA REGIÓN ESTABLE t_{re}

$r_0 (\Omega)$	$t_{rt} (ms)$	$t_{re} (ms)$
0.00001	13	23
0.01	15	25
0.1	19	29
1	14	24
10	13	23
20	15	25
30	28	38
40	41	51
50	99	109
56	698	710

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Para comparar los resultados de la simulación, se utilizo los valores de los componentes electrónicos de

la Tabla ?? y las ecs. ??, para calcular todos los valores de las constantes involucradas en la ec. ?? y se utiliza γ como parámetro de control, usando los mismos valores de r_0 que se uso en las simulaciones. Estos valores se muestran en la Tabla ??, juntos con las condiciones iniciales que se utilizaron en las simulaciones, estas fueron sacadas de los datos de las series temporales. Los comportamientos dinámicos obtenidos se muestran en la Tabla ??, donde solo se ven comportamientos periódicos para los mismos valores usados de r_0 en la sección de simulado. Sin embargo, utilizando los valores clásicos de las pendientes internas y externas de la ec. ??, usados en Conde-Ramirez, et.al., se obtiene los comportamientos señalados en la Tabla ?? que muestra ciclos límites y un comportamiento caótico 1-scroll a primera vista, eventualmente podrían haber mas comportamientos caóticos, pero para fines de este trabajo fue suficiente. Pues, es evidente que si se quiere empalmar con la parte experimental, se debe considerar cada mínimo detalle, detalles que en este trabajo fueron muchos y es evidente porque no se obtiene los mismos valores utilizados por la mayoría de investigadores, los convenios que se tuvieron a un inicio, claramente permanecen.

4.1. Exponentes de Lyapunov y el parámetro d -infinito

Para determinar que gráficas de la tabla ?? son caóticas se utilizo el calculo de los exponentes de Lyapunov en Matlab con un tiempo de integración de 100. Se utilizan los mismos valores calculados de la Tabla ???. Y solo se utilizo (γ) como parámetro de control. Para realizar el calculo de los exponentes de Lyapunov, Se debe realizar una aproximación en la función lineal a tramos del diodo de Chua, ya que se tiene problemas con la derivada al momento de sacar el Jacobiano, en realidad, causa una acumulación de datos (ver anexos) al usar el algoritmo ode45 (Runge-Kutta (4,5)) en Matlab y para solventarlo se debe modificar el código, tal que, evite estos puntos ó, caso contrario, utilizar una función aproximada. En este caso se utilizo una aproximación para la ec.?? con un polinomio cubico, como detallan Ramírez Gallas, Fig. ???. La Tabla ??, muestra los exponentes calculados, junto con los valores de las variables usadas. En la Fig. ?? se gráfica los exponentes de Lyapunov calculados.

El mayor exponente de Lyapunov cuantifica el efecto del fenómeno de estiramiento en un sistema caótico. Sin embargo, en lo que respecta al plegamiento, necesitamos un parámetro más. Para ello, consideremos la siguiente ecuación :

$$d/dt d(t) = \lambda_1 d(t) - (\Gamma) d(t)^2 \quad (7)$$

donde $d(t)$ representa la distancia entre dos trayectorias del mismo sistema dinámico que parten de dos condiciones iniciales diferentes, λ_1 es el mayor exponente de Lyapunov y Γ es un parámetro que explica el fenómeno de plegamiento. La tendencia de $d(t)$ es peculiar cuando se calcula para un sistema caótico:

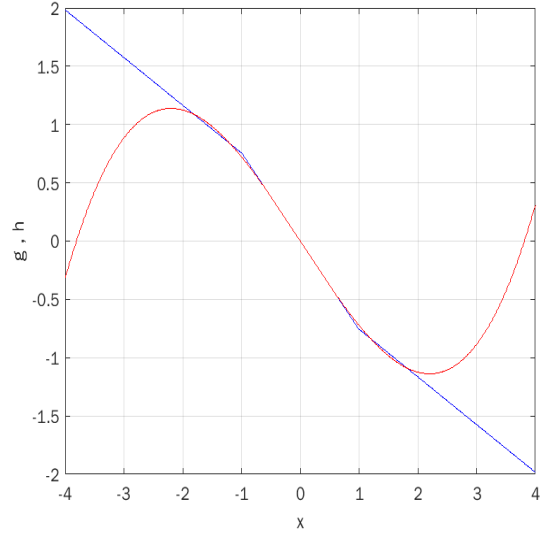


FIG. 5.— Función PWL f y su aproximación con un polinomio cúbico g en el intervalo $[-2, 2]$.

inicialmente, aumenta con una pendiente igual a λ_1 hasta que alcanza un valor estacionario alrededor del cual fluctúa. Este valor estacionario se denomina d -infinito (d) y puede estimarse como $1/\Gamma$. La estimación del parámetro d nos permite también discernir entre el caos determinista y el ruido aleatorio. Para calcular la tendencia de $d(t)$ se utilizo la metodología descrita en Thompson–Steward y adaptada a Matlab, esto se muestra en la Fig. ?? para el caso de $r_0 = 56\Omega$.

La tabla ?? muestra los comportamientos obtenidos en el CCC modificado físico, usando el parámetro de control R . La Tabla ?? muestra los datos del circuito a través de un osciloscopio. Gráficas obtenidas con datos de osciloscopio del circuito de Chua modificado.

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Mediante las series temporales, para el caso de la simulación, se pudo ver si nuestro circuito reproducirá experimentalmente los atractores de Chua, pues cuando las configuraciones, son tales, que no se pasa la región transitoria y no se llega a la región estable, los atractores no se obtienen y solo se manifiestan efectos del transitorio, como se muestra en las gráficas de las simulaciones. Para un valor bajo de resistencia interna, la región estable se alcanza en un menor tiempo de simulación como se ve en la Tabla ?? y esto influye en gran medida que los comportamientos caóticos se puedan presentar cuando se utiliza valores elevados de la resistencia interna del inductor. Se pudo verificar mediante simulaciones que los resultados experimentales de la Tabla ?? son reproducibles, por lo que, se asume que la modificación en el diodo de Chua en efecto tiene una riqueza dinámica que aun falta mucho por explorar debido a que no se encontró investigaciones que ya hayan trabajado exactamente con esta modificación en el diodo de Chua.

Varias cosas estudiadas están en concordancia con los resultados de Conde Ramírez, fueron de mucha

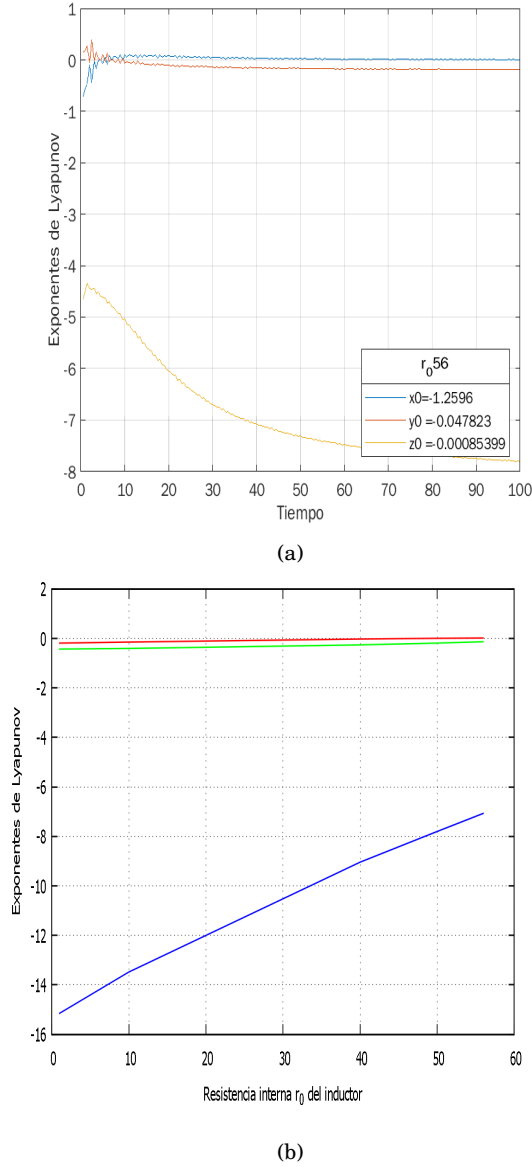


FIG. 6.— Exponentes de Lyapunov de la tabla ?? del CCC para: (a) el caso $r_0 = 56\Omega$ donde la línea roja es λ_1 , verde λ_2 y azul λ_3 . Y en (b) se grafica vs. r_0 .

utilidad, ya que ayudo a corroborar y entender varios resultados encontrados.

La comparación de las características físicas del modelo de Chua con el modelo modificado muestran que las ecuaciones modificada conllevan una mayor complejidad por lo que se espera que la riqueza en

cuanto a su comportamiento dinámico sea mayor, debido a su comportamiento histerético, como pasa en el circuito de Saito. Lo que constituye un desafío para futuras investigaciones. Por un lado, luego de darle el formalismo electrónico necesario, se puede proceder a realizar todos los estudios que hasta hoy se han hecho al circuito de Chua. Y por otro, independientemente de este formalismo se pueden realizar, los cálculos de:

- Exponentes de Lyapunov usando los datos usando Tisean.
- Mapa de bifurcaciones.
- El espacio de

Lyap_t_trans_d/d_infinito_r_50.png

FIG. 7.— Parámetro d-infinito para el caso de $r_0 = 58\Omega$.

parámetros como se realiza en Conde Ramírez y ver si se manifiestan los camarones de Gallas Ramírez. - El modelado matemático de la histéresis, que modificara la función PWL del diodo de Chua. - seguir investigando el fenómeno de histéresis, como lo hace Chua con otros componentes resistencias, inductancias, etc.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a la comunidad de investigadores apasionados de la carrera de Física por haber permitido, ayudado, motivado de una u otra manera desde el área en la que se desenvuelven a realizar el presente trabajo.

APÉNDICE

TABLA 3
 ATRACTORES DE V_{C1} Y V_{C2} A LA IZQUIERDA, SUS SERIES
 TEMPORALES EN LA PARTE CENTRAL JUNTO CON I_L Y LOS
 GRÁFICOS FFT EN LA DERECHA. A EXCEPCIÓN DE LA FIG. 6 Y
 7.

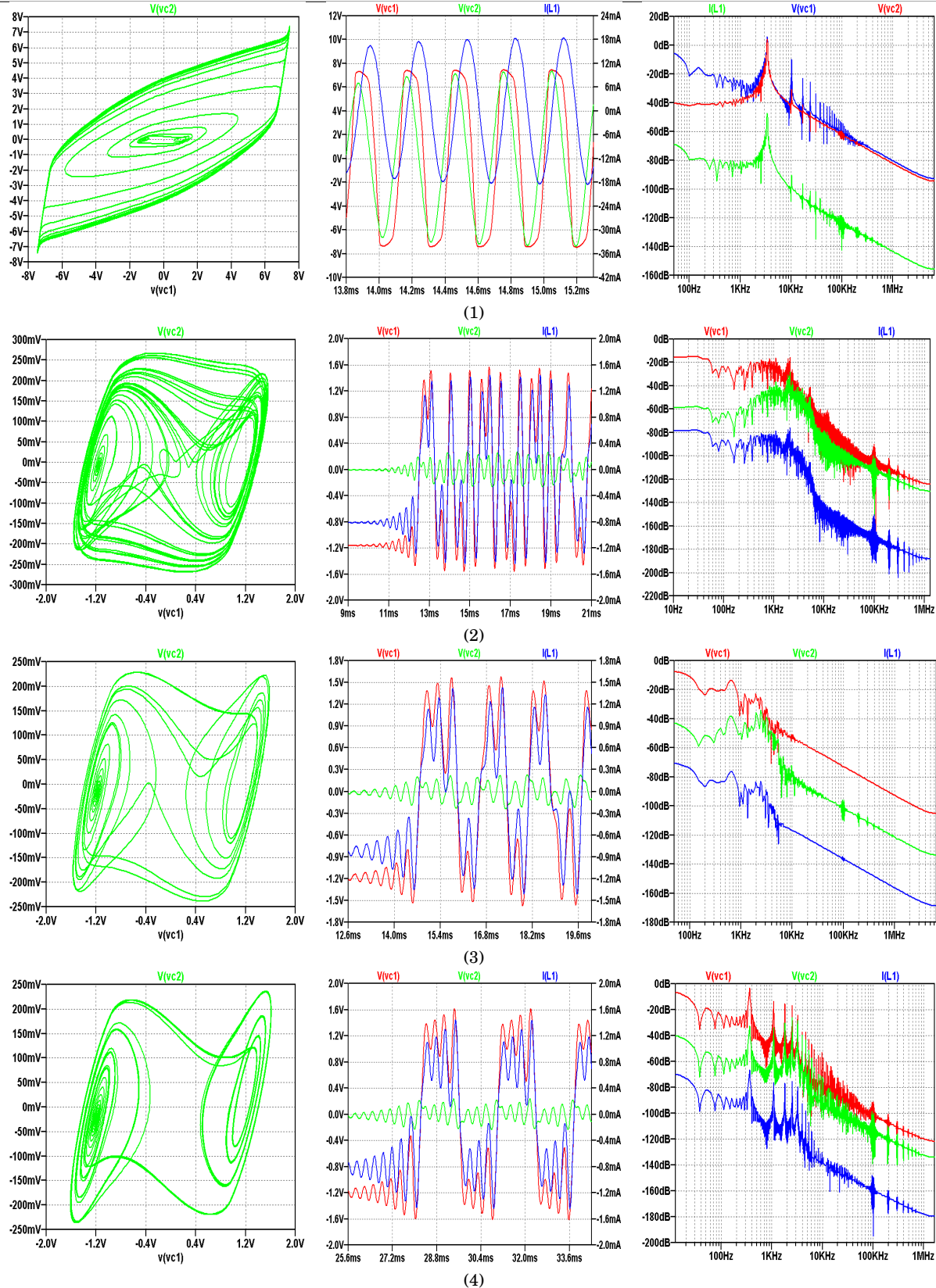


TABLA 4
(CONTINUACIÓN)

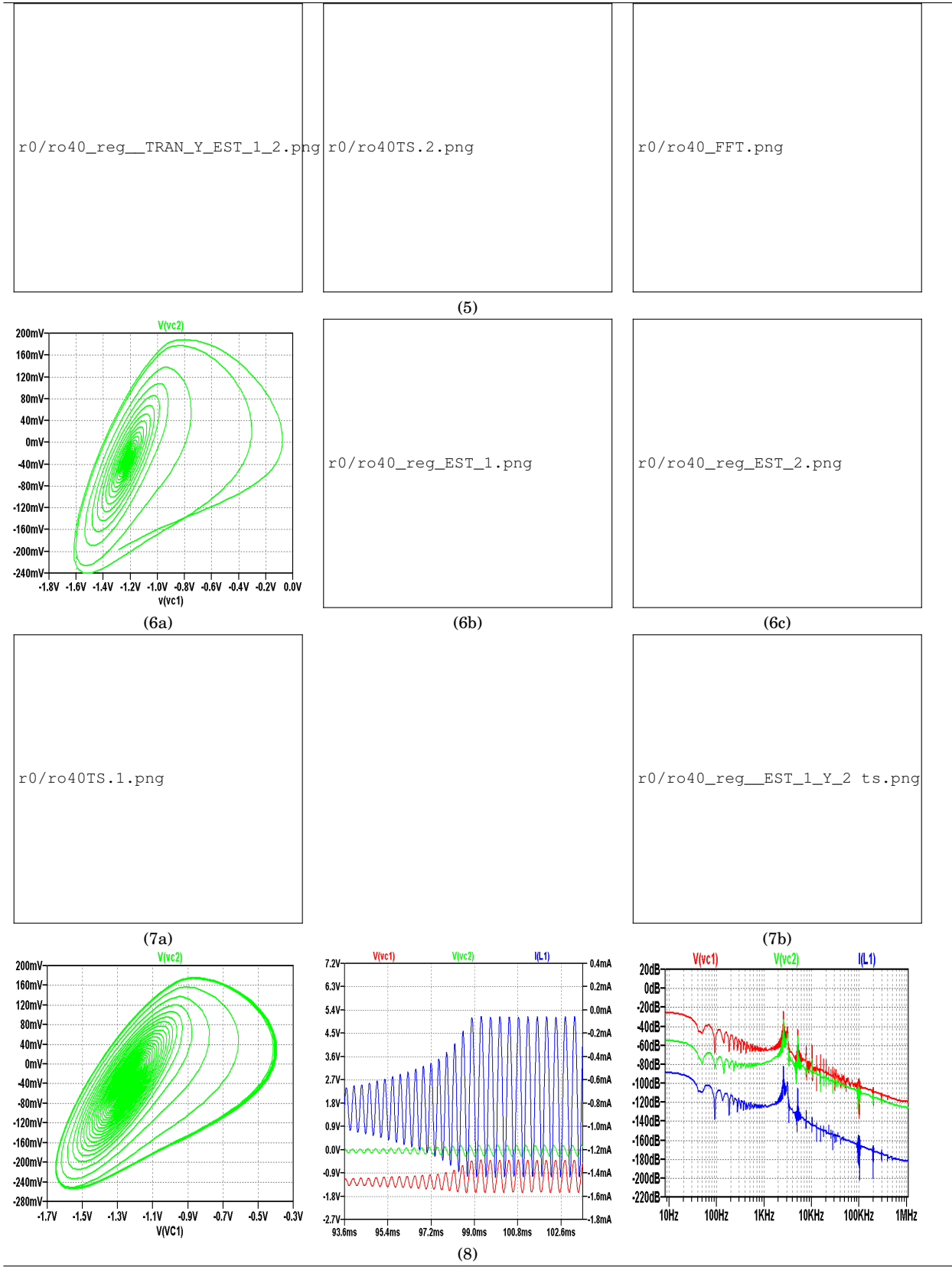


TABLA 5
 GRÁFICAS DE V_{C1} , V_{C2} E I_L , OBTENIDAS EN LA SIMULACIÓN
 DEL CCC MODIFICADO VARIANDO R_0 , JUNTO CON SUS SERIES
 TEMPORALES Y GRÁFICOS FFT.

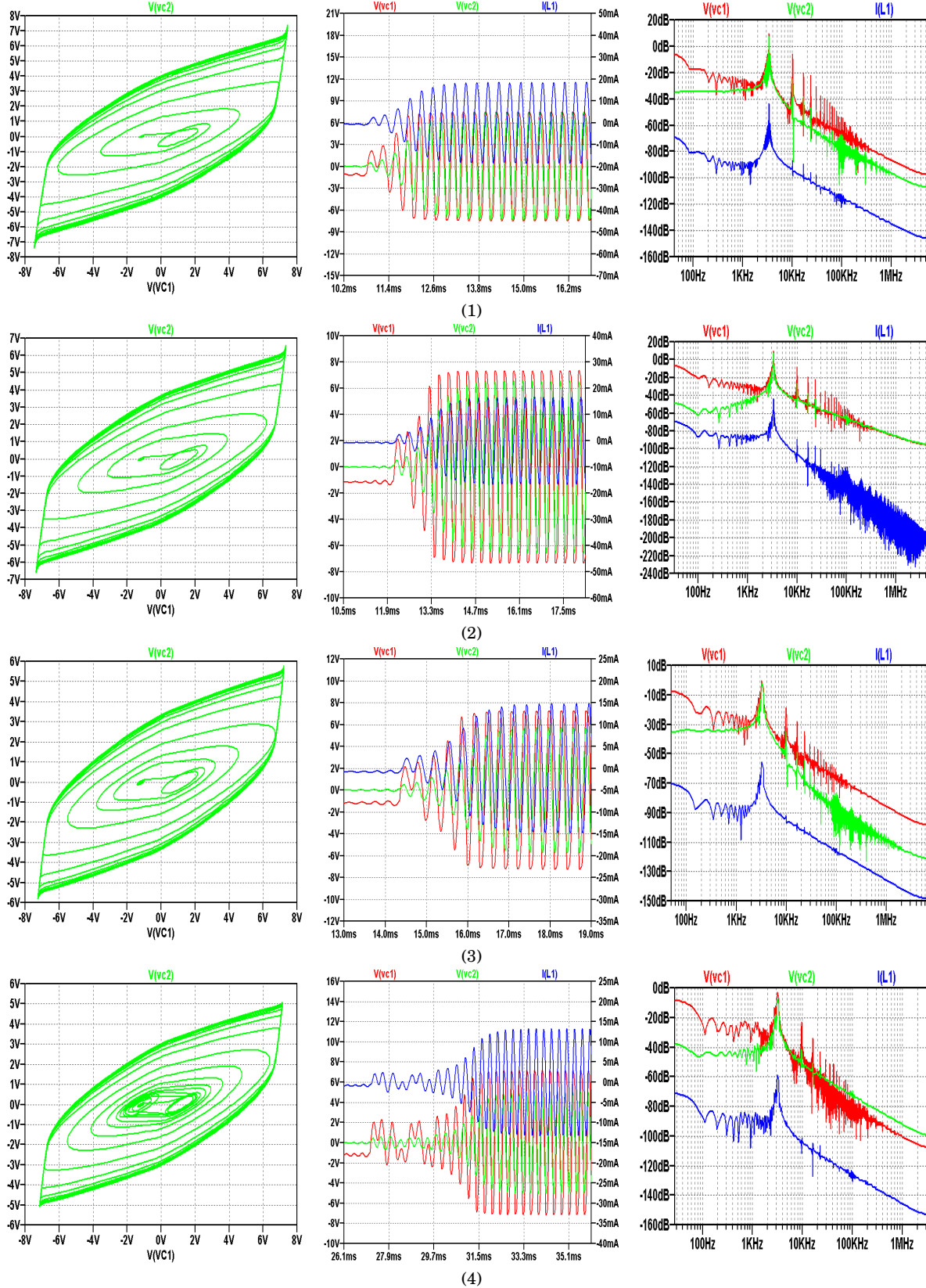


TABLA 6
(CONTINUACIÓN).

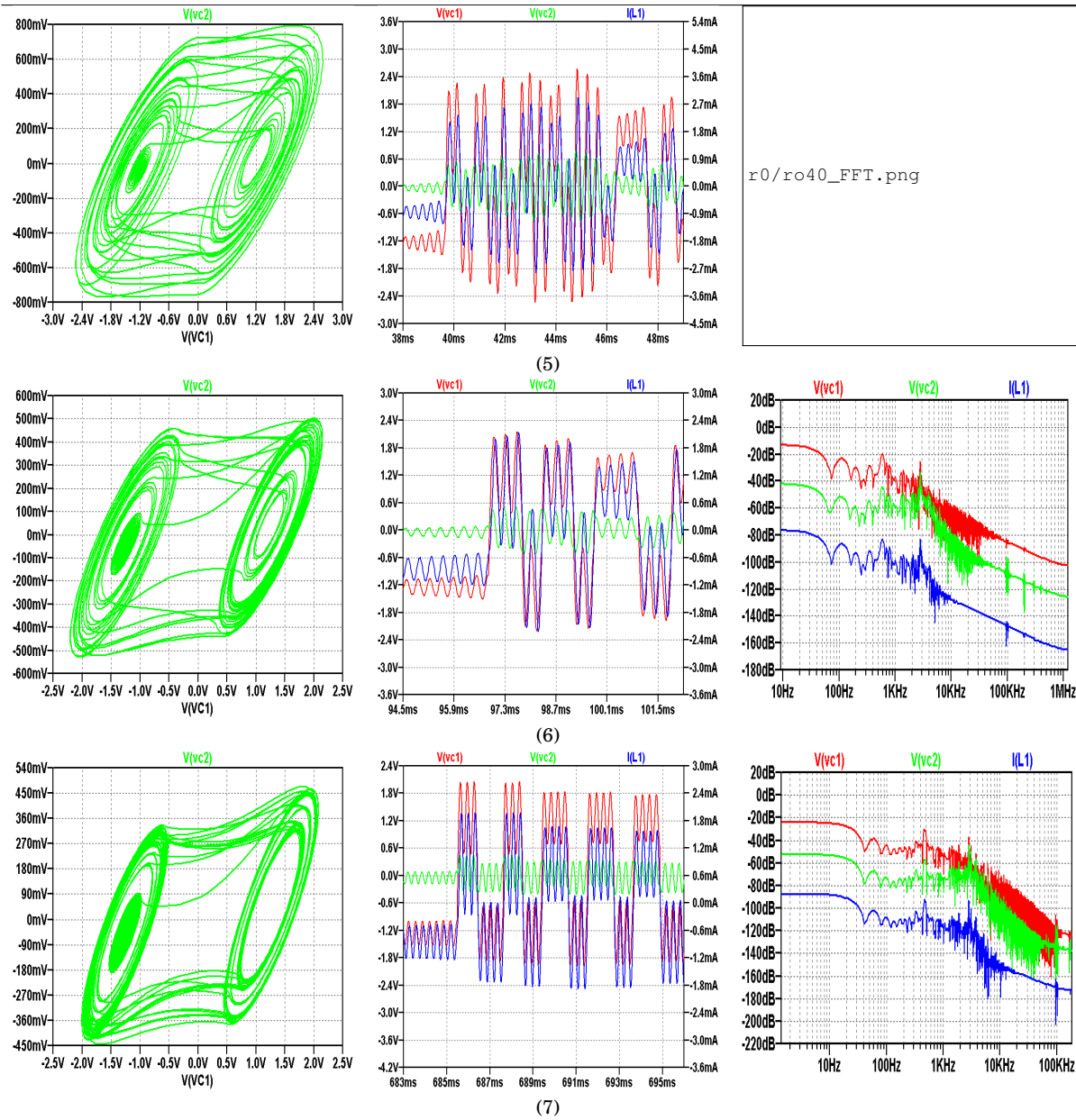


TABLA 7
 GRÁFICAS DE V_{C1} , V_{C2} E I_L , OBTENIDAS EN LA SIMULACIÓN
 DEL CCC VARIANDO R Y r_0 FIJO, JUNTO CON SUS SERIES
 TEMPORALES Y GRÁFICOS FFT.

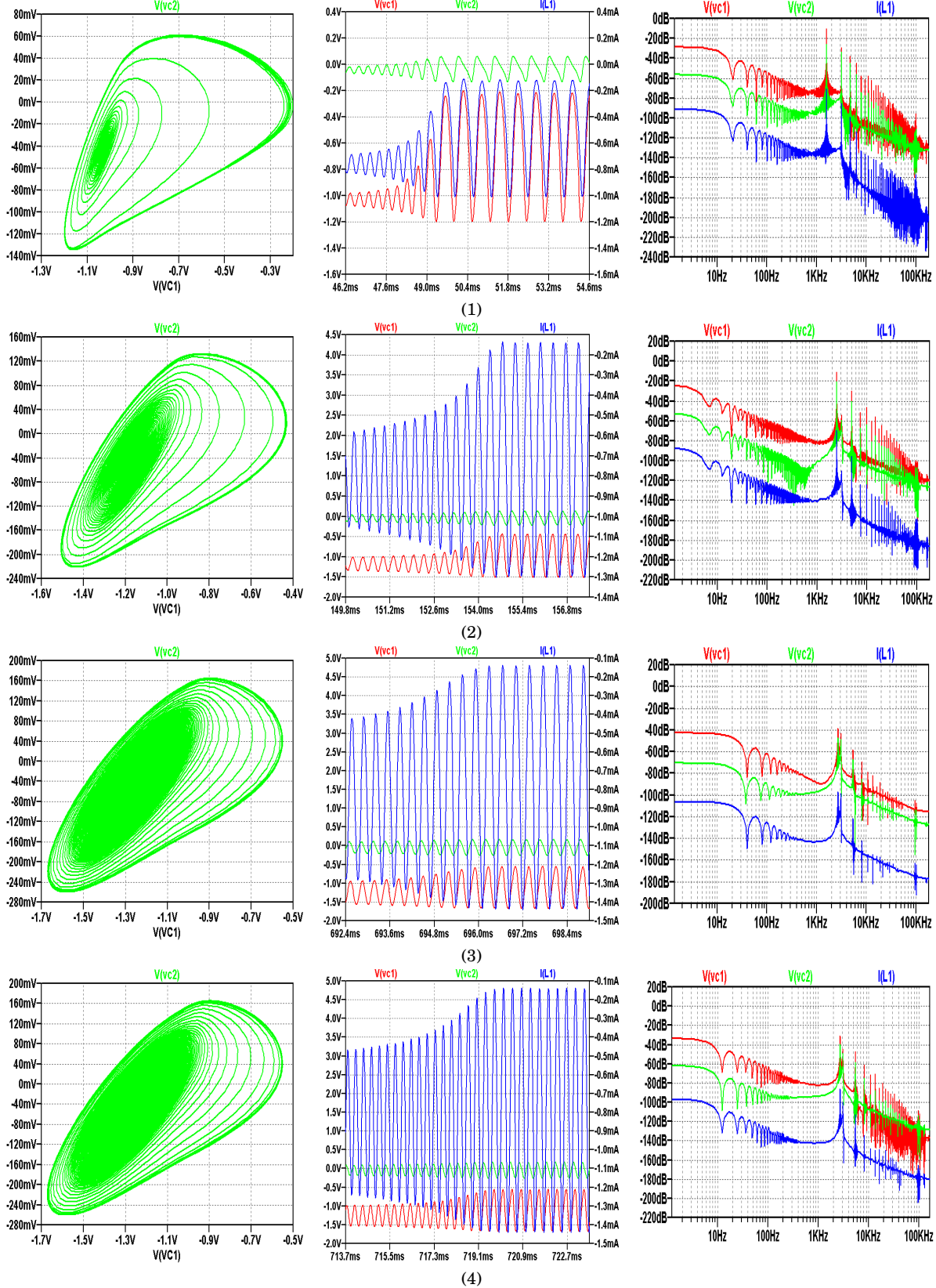


TABLA 8
GRÁFICAS DE V_{C1} , V_{C2} E I_L , OBTENIDAS EN LA SIMULACIÓN
DEL CCC MODIFICADO USANDO R COMO PARÁMETRO DE
CONTROL Y $r_0=56$
(Ω) fijo, junto con sus series temporales y gráficos FFT.

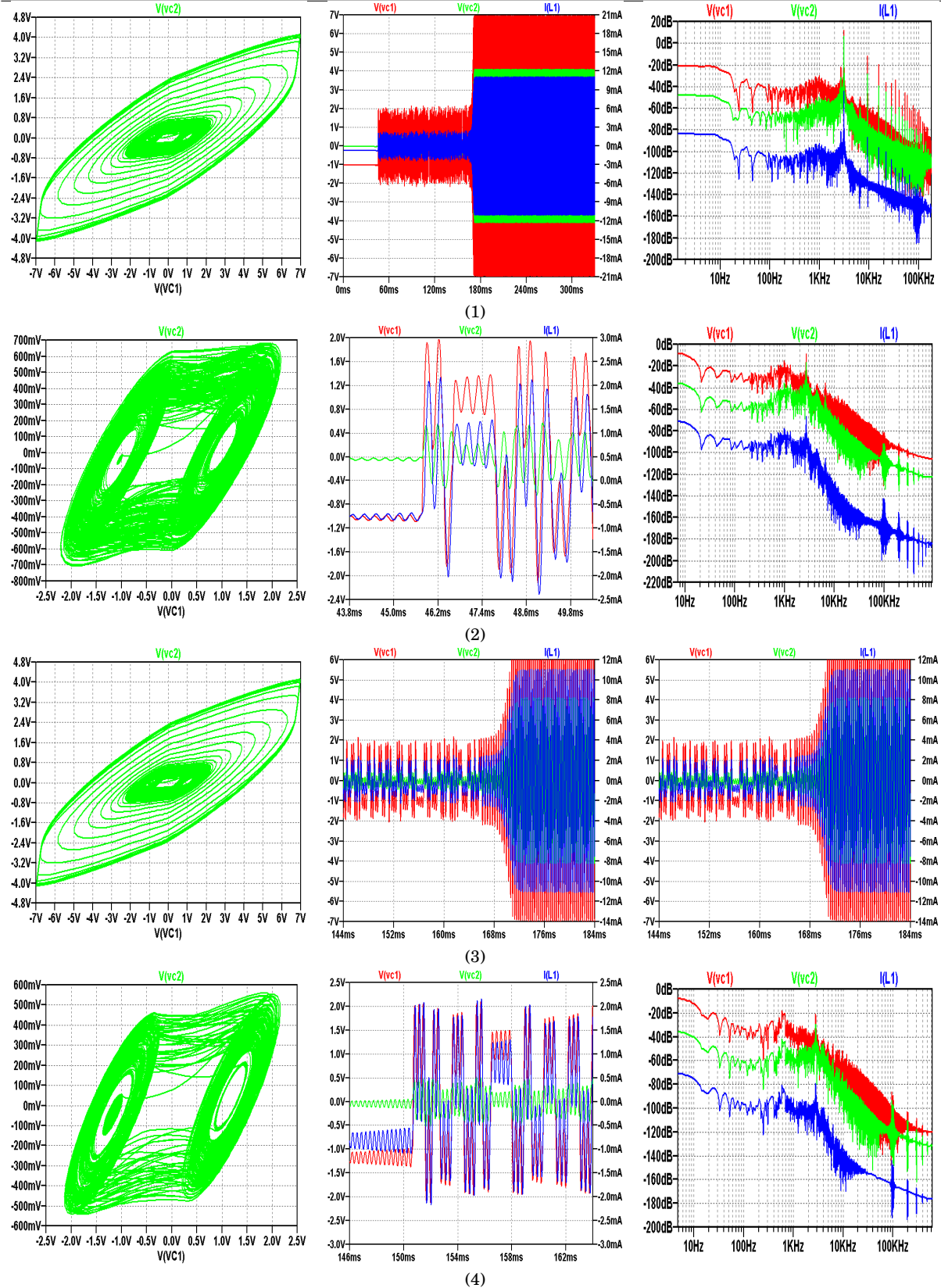


TABLA 9
(CONTINUACIÓN).

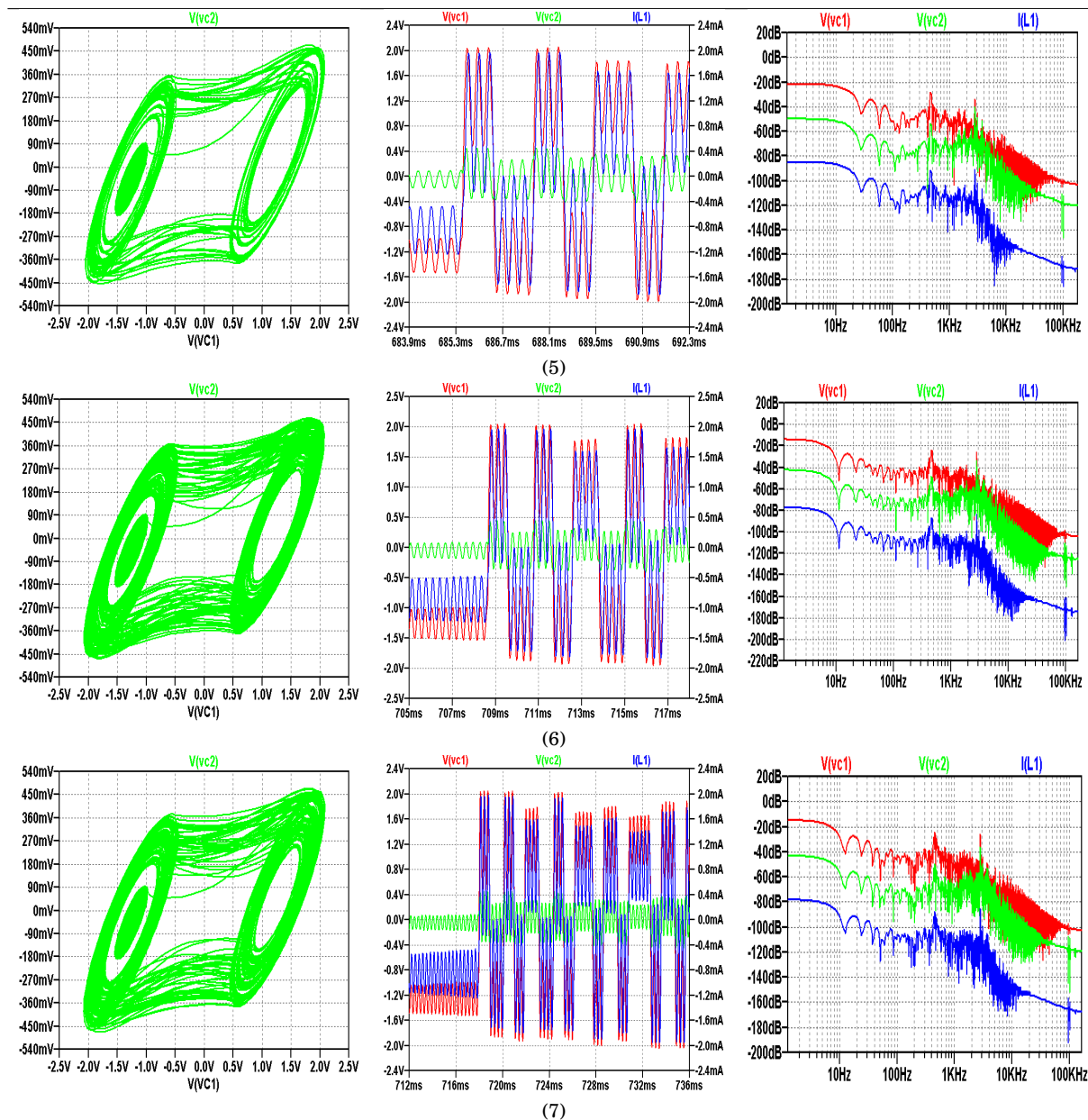


TABLA 10
(CONTINUACIÓN).

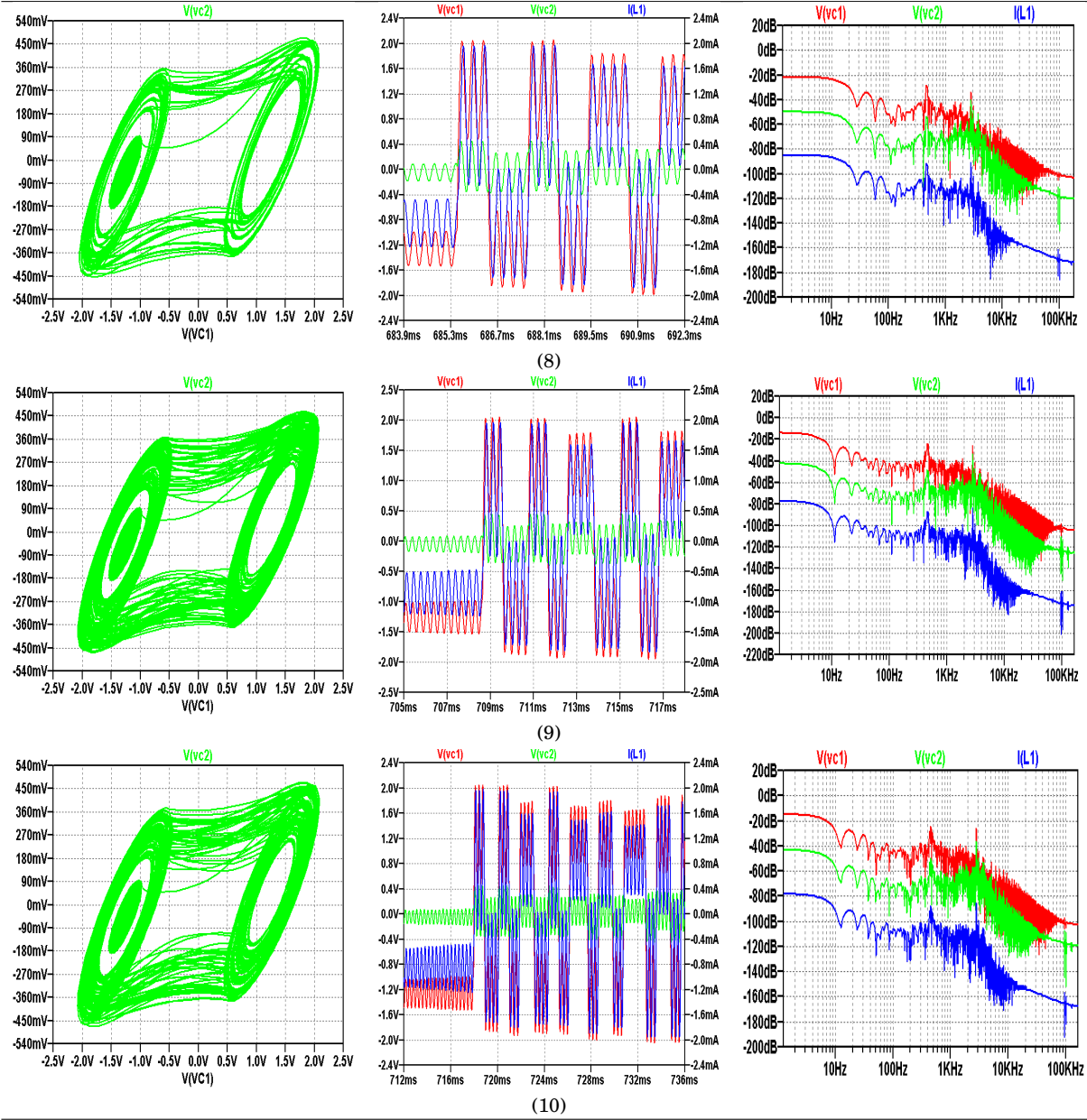


TABLA 11
VALORES DE r_0 , LOS CORRESPONDIENTES VALORES DE
 α, β y γ . Consus respectivas condiciones iniciales.

r_0 (Ω)	α	β	γ	x_0	y_0	z_0
1	10	11.18645	0.00788	-1.16357	-0.00814	-0.00081
10	10	11.18645	0.07883	-1.16357	-0.00814	-0.00081
40	10	11.18645	0.31533	-1.22525	-0.03359	-0.00084
50	10	11.18645	0.39417	-1.24661	-0.04243	-0.00080
56	10	11.18645	0.44147	-1.25963	-0.04782	-0.00085

TABLA 12

LOS GRÁFICOS OBTENIDOS MEDIANTE LAS EC. ??, USANDO LA FUNCIÓN DEL DIODO DE CHUA APROXIMADO CON UN POLINOMIO CUBICO, USANDO EL PARÁMETRO DE CONTROL γ . Cada imagen está enumerada en la parte inferior. Y los valores de R_0 USADOS ESTÁN DADOS EN UN RECUADRO DENTRO LA MISMA IMAGEN, COMO TAMBIÉN SUS CONDICIONES INICIALES.

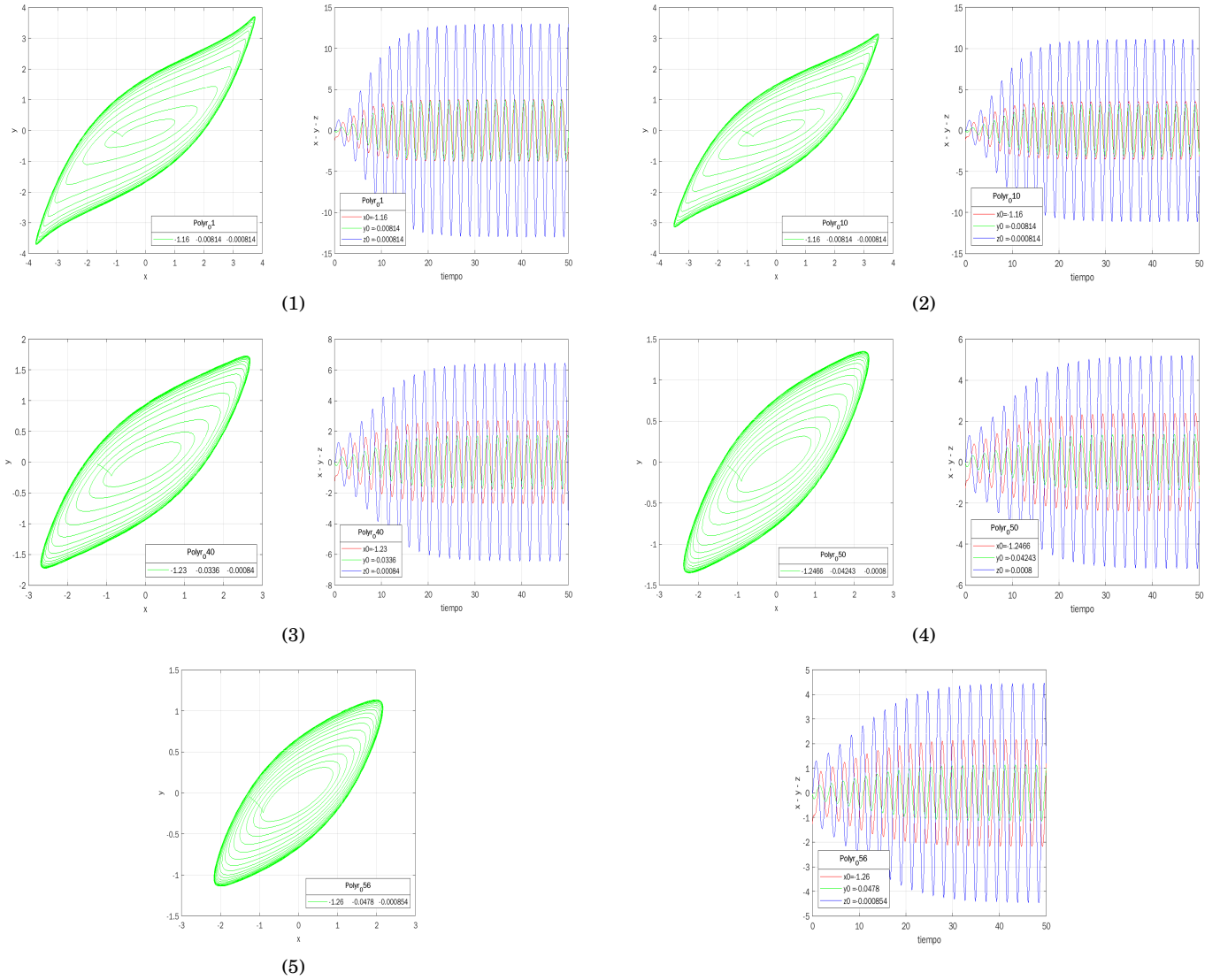


TABLA 13

GRÁFICAS OBTENIDAS MEDIANTE LAS EC. ??, USANDO LA
FUNCIÓN DEL DIODO DE CHUA APROXIMADA CON UN
POLINOMIO Y

γ como parámetro de control. Y usando los parámetros de las pendientes de las cascas de Conde—
Rmírez. Cada imagen contiene información de R_0 Y LAS
CONDICIONES INICIALES Y SU CORRESPONDIENTE
NUMERACIÓN.

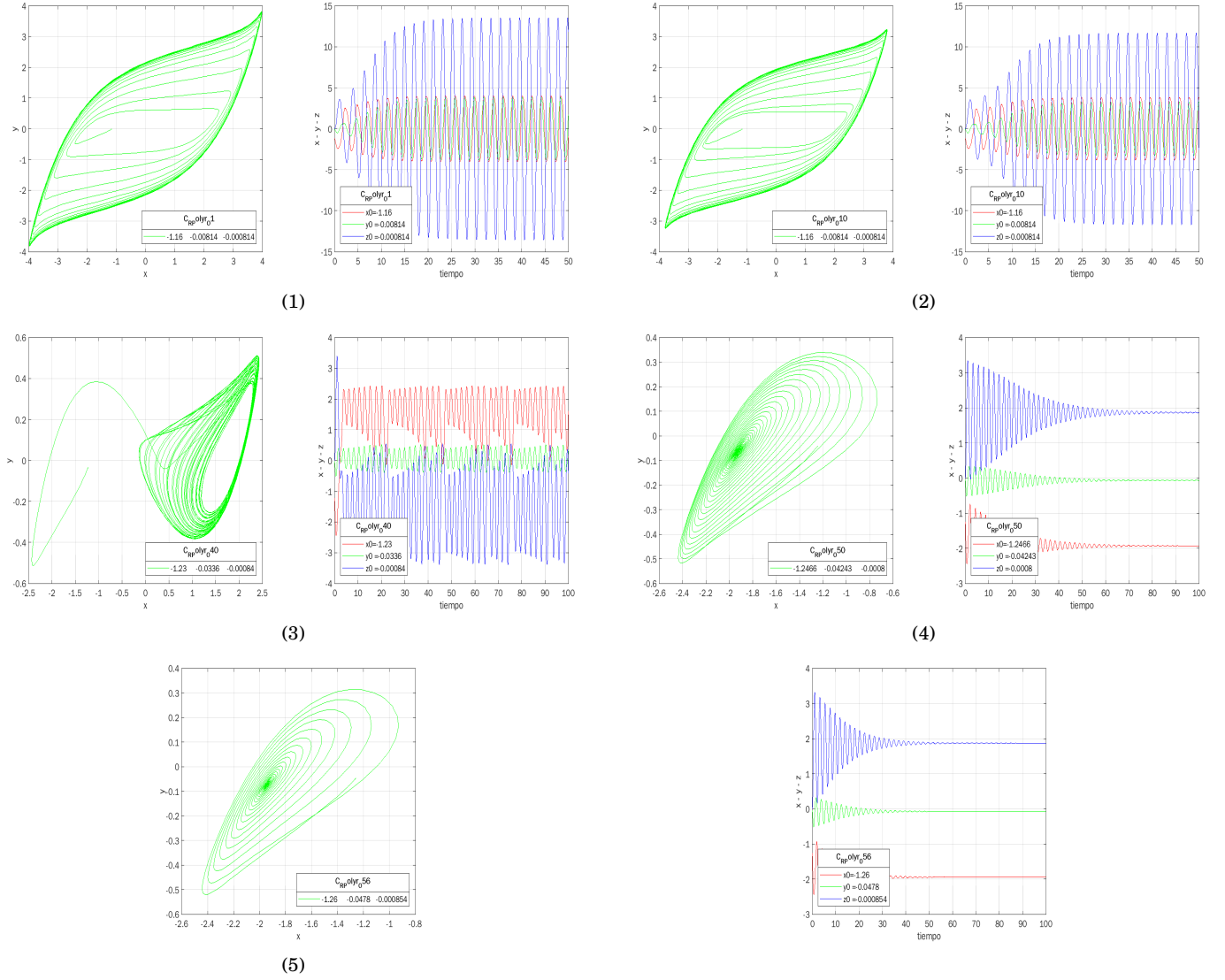


TABLA 14

EXPONENTES LYAPUNOV PARA EL CCC CON
 γ como parámetro de control.

$r_0(\Omega)$	gamma	x_0	y_0	z_0	λ_1	λ_2	λ_3	
1	56	0.44147	-1.25963	-0.04782	-0.00085	0.016871	-0.131181	-7.071438
2	50	0.39417	-1.24661	-0.04243	-0.00080	0.004856	-0.188533	-7.802514
3	40	0.31533	-1.22525	-0.03359	-0.00084	-0.024541	-0.258835	-9.043396
4	10	0.07883	-1.16357	-0.00814	-0.00081	-0.146213	-0.402821	-13.482867
5	1	0.00788	-1.16357	-0.00814	-0.00081	-0.188466	-0.429689	-15.154892

TABLA 15
COMPORTAMIENTOS OBTENIDOS EN DEL CIRCUITO DE CHUA
FÍSICO. CADA IMAGEN ESTA CON SU CORRESPONDIENTE
NUMERACIÓN.

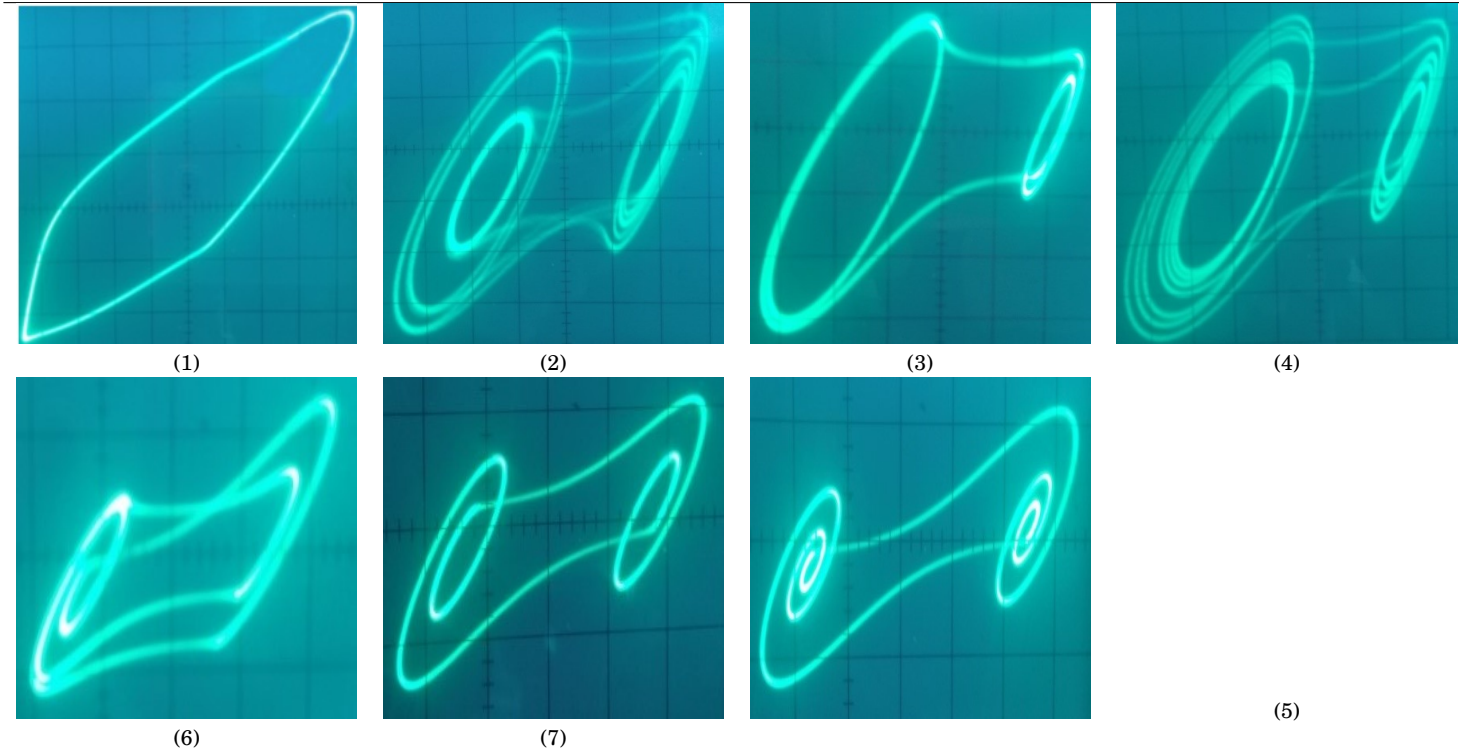


TABLA 16
COMPORTAMIENTOS OBTENIDOS MEDIANTE LOS DATOS DE UN
OSCILOSCOPIO DEL CIRCUITO DE CHUA MODIFICADO. CADA
IMAGEN ESTA CON SU CORRESPONDIENTE NUMERACIÓN.

