



**I
N
A
O
E**

Modelado Comportamental de una Clase de Circuitos Caóticos Mediante el uso de SC-CNNs

Por
Salvador Flores Gutiérrez

Tesis sometida como requisito parcial para
obtener el grado de

**Maestro en Ciencias en la
Especialidad en Electrónica**

en el

**Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica**
Julio 2008. Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:
Dr. Luis Hernández Martínez
Investigador Titular del INAOE

©INAOE 2008

Derechos Reservados

El autor otorga al INAOE el permiso de
reproducir y distribuir copias de esta
tesis en su totalidad o en partes



INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFÍSICA, ÓPTICA Y ELECTRÓNICA

Maestría en la Especialidad en Electrónica



Modelado Comportamental de una Clase de Circuitos Caóticos Mediante el uso de SC-CNNs

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el
grado de:
Maestro en Ciencias en la Especialidad en Electrónica

Presenta:
Salvador Flores Gutiérrez

Asesor:
Dr. Luis Hernández Martínez

Julio 2008. Tonantzintla, Puebla

Resumen

En la actualidad cada vez es más necesario contar con métodos versátiles que nos permitan modelar, simular e implementar distintos tipos de sistemas. Tal es el caso de las redes neuronales celulares (CNNs) y las redes neuronales celulares de estado controlado (SC-CNNs).

Uno de estos métodos son las SC-CNNs las cuales consisten en un arreglo rectangular de $M \times N$ celdas. Debido a que no siempre es necesario un arreglo rectangular, también se puede utilizar a las SC-CNNs como un arreglo de m filas de celdas SC-CNN interconectadas localmente, con este tipo de arreglo es posible desarrollar sistemas de ecuaciones de estado de la forma $\dot{x}_i = -x_i + \sum_k (A_{ik}y_k + C_{ik}x_k) + i_i$.

En este trabajo se utilizarán las SC-CNNs para desarrollar una metodología que nos permita modelar mediante el uso de SC-CNNs a cierta clase de sistemas de la forma antes mencionada.

La metodología se aplica en particular a dos casos de estudio el circuito de Chua y el circuito de Saito. Siguiendo los pasos de la metodología se obtienen las ecuaciones de estado, los parámetros de las ecuaciones de estado que generan caos, se obtienen los patrones de retroalimentación y de estado de las SC-CNNs, se modelan en HSPICE mediante subcircuitos que representan a una celda SC-CNN y por último, se comparan los resultados de las simulaciones de los análisis transitorios en MATLAB y en HSPICE para verificar el funcionamiento correcto del modelado.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado para poder realizar mis estudios de maestría.

A mi asesor el Dr. Luis Hernández Martínez

A mi Padre, mis Hermanas, mi Tía, mi Abuela y a toda mi familia por el apoyo que siempre me han brindado.

Contenido

Resumen.....	V
Agradecimientos	VII
Contenido	IX
Prefacio	XIII
Capítulo 1	1
Introducción.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Motivación	2
1.3 Objetivo.....	3
Capítulo 2	5
Circuitos Caóticos de Chua y Saito	5
2.1 Introducción	5
2.2 Antecedentes de los Circuitos Caóticos.....	6
2.3 Circuito de Chua	7
2.3.1 Ecuaciones del Circuito de Chua	9
2.3.2 Ecuaciones Adimensionadas del Circuito de Chua	10
2.4 Circuito de Saito.....	11
2.4.1 Ecuaciones del Circuito de Saito.....	13
2.4.2 Ecuaciones Adimensionadas del Circuito de Saito.....	14

Capítulo 3	17
CNNs y SC-CNNs.....	17
3.1 Introducción	17
3.2 Redes Neuronales Celulares (CNNs).....	18
3.2.1 Definiciones Fundamentales de CNNs	19
3.2.2 Circuito de la Celda de una CNN	21
3.2.3 Ecuaciones del Circuito de la Celda de una CNN.....	23
3.3 Redes Neuronales Celulares de Estado Controlado (SC-CNNs) ..	24
3.3.1 Definiciones Fundamentales de SC-CNNs	24
3.3.2 Circuito de la Celda de una SC-CNN	25
3.3.3 Ecuaciones del Circuito de la Celda de una SC-CNN	26
 Capítulo 4	 29
Modelado de una Clase de Circuitos Caóticos Mediante el uso de SC-CNNs	29
4.1 Introducción	29
4.2 Modelo Generalizado de una Celda SC-CNN.....	30
4.3 Metodología del Modelado Comportamental Mediante SC-CNNs	32
4.3.1 Definición de las Ecuaciones de Estado.....	33
4.3.2 Simulación de las Ecuaciones de Estado en MATLAB	33
4.3.3 Obtención de los Patrones de Retroalimentación y de Estado de las SC-CNNs	34
4.3.4 Modelado de las Ecuaciones de Estado Mediante SC-CNNs	36
4.3.5 Comparación de Resultados.....	36
 Capítulo 5	 37

Casos de Estudio	37
5.1 Introducción	37
5.2 Análisis Transitorio del Circuito de Chua	38
5.3 Análisis Transitorio del Circuito de Chua Adimensionado	41
5.4 Análisis Transitorio del Circuito de Saito.....	45
5.5 Análisis Transitorio del Circuito de Saito Adimensionado.....	49
Capítulo 6	55
Conclusiones.....	55
6.1 Conclusiones	55
6.2 Trabajo Futuro.....	56
Apéndice A.....	57
Modelo en HSPICE de la SC-CNN.....	57
A.1 Subcircuito que Modela la SC-CNN	57
A.1.1 Subcircuito para una Celda SC-CNN.....	57
A.1.2 Subcircuito para m-Celdas SC-CNN.....	58
A.2 Sintaxis del Subcircuito de una SC-CNN	59
Apéndice B.....	61
Programas en MATLAB	61
B.1 Listados de Programas.....	61
B.1.1 Listado del Circuito de Chua	61
B.1.2 Listado del Circuito de Chua Adimensionado.....	62
B.1.3 Listado del Circuito de Saito.....	63
B.1.4 Listado del Circuito de Saito Adimensionado	64

Apéndice C.....	67
Listados de HSPICE	67
C.1 Listados de los Circuitos Caóticos.....	67
C.1.1 Circuito de Chua en HSPICE	67
C.1.2 Circuito de Chua Adimensionado en HSPICE	69
C.1.3 Circuito de Saito en HSPICE.....	70
C.1.4 Circuito de Saito Adimensionado en HSPICE	72
Índice de Figuras.....	75
Índice de Tablas.....	77
Bibliografía.....	79

Prefacio

La necesidad de un método versátil que permita modelar, simular e implementar sistemas, ha provocado que se enfoque la atención hacia las redes neuronales celulares de estado controlado (SC-CNNs). Cada celda de una SC-CNN representa una ecuación de estado, y dependiendo de la forma de la ecuación de estado se puede obtener un cierto grupo o clase de sistemas. Es por ello que se requiere una metodología de modelado que permita obtener los parámetros adecuados de las celdas SC-CNNs para un sistema en particular. Una vez que se han obtenido los parámetros de las SC-CNNs existen varias formas de implementar una celda, y por tanto, se puede elegir la implementación que mas nos convenga.

Esta tesis trata sobre el modelado comportamental de una clase de circuitos caóticos mediante el uso de SC-CNNs y esta dividida en seis capítulos.

En el capítulo 1 se presenta una introducción sobre el modelado comportamental mediante SC-CNNs y se citan algunos trabajos acerca de SC-CNNs.

En el capítulo 2 se analizan los circuitos caóticos de Chua y Saito, y se presentan las ecuaciones dimensionadas y adimensionadas de los circuitos.

El capítulo 3 aborda un estudio acerca de las CNNs y SC-CNNs, donde se muestran algunas definiciones fundamentales, los circuitos de las celdas, y las ecuaciones que describen el comportamiento de las celdas.

En el capítulo 4 se describe el modelo utilizado para la celda SC-CNN y se detalla la metodología del modelado comportamental mediante SC-CNNs.

En el capítulo 5 se presentan los análisis transitorios de los circuitos dimensionados y adimensionados de Chua y Saito, tanto en MATLAB como en HSPICE.

Finalmente en el capítulo 6 se especifican las conclusiones que se obtuvieron en este trabajo de tesis.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Una rama de las matemáticas que siempre ha llamado la atención y que tiene mucho auge son los sistemas dinámicos, dentro de estos sistemas encontramos sistemas estables, inestables y caóticos.

En los últimos años los sistemas caóticos han adquirido gran importancia debido a la naturaleza impredecible que los caracteriza. Al principio el estudio de los sistemas dinámicos solo incluía a los sistemas estables e inestables, pero una vez que fue descubierto el caos por Henri Poincaré, muchos investigadores han trabajado sobre este tema y han encontrado muchos modelos de sistemas caóticos.

De la misma manera se han trabajado y estudiado muchas topologías de circuitos eléctricos y mediante el análisis de sus ecuaciones de estado se ha encontrado que algunas de ellas presentan un comportamiento caótico. A partir de entonces se han implementado tales circuitos mediante el uso de OPAMs, OTAs, CFOAs, etc., pero con muy poca versatilidad.

Un método más flexible que permite implementar sistemas de la forma $\dot{x}_i = -x_i + \sum_k (A_{ik}y_k + B_{ik}u_k + C_{ik}x_k) + i_i$ son las redes neuronales celulares de estado controlado (SC-CNN). Las redes neuronales celulares de estado

controlado son una generalización de las redes neuronales celulares (CNNs), pero a diferencia de estas, las SC-CNNs tienen una dependencia del patrón de estado. En nuestro caso, nos interesa realizar una metodología que permita realizar el modelado de un cierto grupo o clase de sistemas que tienen la forma $\dot{x}_i = -x_i + \sum_k (A_{ik} y_k + C_{ik} x_k) + i_i$. Cada sistema de m -ecuaciones tiene asociado un arreglo de m filas de celdas SC-CNN interconectadas localmente. Para ejemplificar el uso de la metodología de modelado mediante SC-CNNs se presentan dos casos de estudio que son el circuito caótico de Chua, y el circuito caótico de Saito, los cuales encajan dentro de este grupo o clase de sistemas. De la misma forma se puede observar que aplicando pequeños cambios a la metodología está se vuelve útil para el caso más general.

1.2 Motivación

Hoy en día las CNNs y las SC-CNNs son una rama de estudio de creciente interés, la cual cuenta con bastantes aplicaciones tanto a nivel software como a nivel hardware. Es por eso que es importante conocer como están constituidas y entender la manera en que funcionan para poder emplearlas en nuestras propias aplicaciones.

En el caso de las SC-CNNs existen una gran cantidad de trabajos que incluyen desde aspectos teóricos sobre una clase de circuitos caóticos basados en SC-CNNs [4], hasta estrategias que permiten extender el grupo o clase de circuitos caóticos que pueden ser generados por SC-CNNs [5].

Las SC-CNNs se han utilizado para implementar diferentes circuitos caóticos como el circuito de Chua [6], el circuito Saito [9], el oscilador de Colpitts [11] e incluso se ha utilizado a las SC-CNNs para generar el comportamiento de n -doble scrolls, basados en el circuito caótico de Chua

con la respectiva modificación de su elemento no lineal [12], en [13] también se ha realizado el generador de n -doble scrolls pero con la diferencia de que la función lineal a trozos es generada por medio de diodos. Estas implementaciones están basadas en celdas propuestas en [6], las cuales están constituidas por tres bloques, cada bloque utiliza un OPAM como bloque básico de construcción, por otro lado en [7] se propone una implementación que solo utiliza 2 OPAMs por cada celda, y en [15] se presenta una implementación en CMOS de una celda de estado controlado. Finalmente, en [14] se ha reproducido el circuito de Chua usando SC-CNNs, pero en vez de utilizar OPAMs como el bloque básico de construcción de la celda SC-CNN se han utilizado nullors de cuatro terminales flotantes (FTFN).

En lo referente a las aplicaciones en [16] y [20], se tratan los fundamentos de las transmisiones seguras usando SC-CNNs, mientras que en [17] y [21], se presentan los resultados experimentales y de simulación de la transmisión de señales usando SC-CNNs. A su vez, otra aplicación interesante como se muestra en [18] es la generación de una función cualquiera lineal a trozos (PWL), mediante funciones básicas PWL generadas por celdas CNNs, además en [19] se presenta una herramienta generadora de señales multifunción basada en SC-CNNs.

Como se puede ver las SC-CNNs tienen un campo de aplicación muy interesante y es por eso que se eligió trabajar en este tema de investigación.

1.3 Objetivo

El objetivo de esta tesis es poder desarrollar una metodología que nos permita modelar y simular comportamentalmente a cierta clase de circuitos caóticos de la forma $\dot{x}_i = -x_i + \sum_k (A_{ik}y_k + C_{ik}x_k) + i_i$.

Capítulo 2

Circuitos Caóticos de Chua y Saito

2.1 Introducción

Existen distintos tipos de sistemas dinámicos y se clasifican como: estables, inestables y caóticos. Este capítulo, habla acerca de los sistemas dinámicos caóticos, y en particular, se analizan sistemas dinámicos de la forma $\dot{x}_i = -x_i + \sum_k (A_{ik} y_k + C_{ik} x_k) + i_i$, dentro de los cuales se puede encontrar al circuito de Chua, y al circuito de Saito, entre otros. El motivo de analizar tales circuitos es que en capítulos posteriores se modelarán y simularán por medio de SC-CNNs.

El objetivo final es poder desarrollar una metodología que nos permita modelar y simular comportamentalmente a los circuitos antes mencionados. Pero para ello, se debe tener bien caracterizados a tales circuitos, es por eso que en este capítulo se especifican tanto las ecuaciones de estado obtenidas normalmente por medio de análisis de mallas y de nodos, como las ecuaciones adimensionadas que se obtienen al hacer un cambio de variable, ya que el método o procedimiento que se quiere utilizar debe funcionar para ambos casos.

2.2 Antecedentes de los Circuitos Caóticos

Como sabemos los circuitos caóticos forman parte de los sistemas dinámicos caóticos. La teoría del caos estudia ciertos tipos de comportamientos impredecibles de los sistemas dinámicos, en especial de los sistemas dinámicos caóticos. El primero que descubrió el caos fue Henri Poincaré en 1890, mientras estudiaba el problema de los tres cuerpos, él descubrió que podían haber órbitas no periódicas en tal problema, aunque trató de acercarse a un punto fijo, él no pudo aproximarse. Por otro lado, la teoría del caos no tiene un solo fundador y se le atribuye a varias personas como: Lorenz, Benoit Mandelbrot, Mitchell Feigenbaum, Libchaber, Winfree, Mandell, por mencionar algunos.

En el transcurso de cincuenta años de investigación del caos se han propuesto varios modelos clásicos o modelos prototipos de sistemas dinámicos caóticos tales como: Lorenz, Duffing, van der Pol, Ueda, Fermi-Uland, y Hénon-Heiles [24]. Es necesario tener siempre presente que los modelos de sistemas dinámicos caóticos son bastante sensibles a las condiciones iniciales, puesto que con una mínima variación de las condiciones se provoca que el sistema responda de manera diferente. En la actualidad la teoría del caos se aplica a muchas disciplinas científicas entre las cuales tenemos: matemáticas, biología, ciencias computacionales, economía, ingeniería, finanzas, filosofía, física, política, dinámica de poblaciones, psicología y robótica. Ahora si buscamos sistemas dinámicos caóticos a nuestro alrededor los podemos encontrar en circuitos eléctricos, en los láseres, reacciones de oscilaciones químicas, dinámica de fluidos y dispositivos mecánicos y magneto-mecánicos. Mientras tanto en la naturaleza los encontramos en la atmósfera terrestre, el sistema solar, las placas tectónicas, los fluidos en régimen turbulento, en el crecimiento de las poblaciones, en el tiempo de evolución de los campos magnéticos de cuerpos celestes, vibraciones moleculares, etc. [27].

En lo referente a circuitos eléctricos, existen muchos trabajos que implementan circuitos caóticos, algunos son implementados mediante SC-CNNs [6], [9], [11], dentro de los circuitos caóticos más conocidos tenemos: el circuito de Chua, el circuito de Lorenz, el circuito de Rossler, el circuito de Saito, etc. Estos circuitos han adquirido gran importancia principalmente en el área de comunicaciones y se aplican comúnmente en la encriptación de señales y comunicaciones seguras [16]. En este trabajo se modelará y simulará al circuito de Chua y al circuito de Saito, por tanto, en los siguientes puntos se describe a estos circuitos.

2.3 Circuito de Chua

Uno de los circuitos caóticos más estudiados en los últimos años, es el circuito de Chua Fig. 2.1. El circuito de Chua es el circuito electrónico autónomo no lineal más simple de tercer orden, con una gran variedad de comportamientos dinámicos incluyendo caos, resonancia estocástica, espectro de ruido, e intermitencia caos-caos [6]. El circuito de Chua se ha utilizado en sencillos sistemas de transmisión de información digital usando señales caóticas como portadoras, también se han utilizado arreglos de 8×8 circuitos de Chua para reconocer gestos de una mano, e inclusive se ha utilizado al circuito de Chua con retardo para simular diferentes sonidos y emplearlo en la sintetización de sonidos de instrumentos musicales [25].

Desde la aparición del circuito de Chua hasta la fecha, se han reportado una amplia variedad de bifurcaciones y fenómenos caóticos, los cuales han sido obtenidos exitosamente por medio de modelos experimentales y simulaciones por computadora. Además, cada día se incrementa el interés por este circuito y por la búsqueda de nuevas aplicaciones.

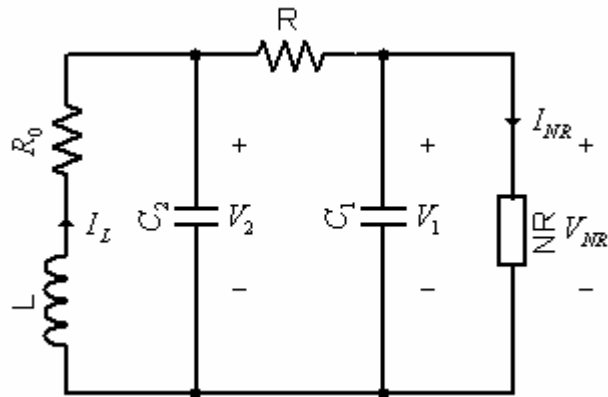


Figura 2.1 Circuito de Chua

El circuito de la Fig. 2.1 fue presentado por primera vez por Chua, y esta compuesto de 5 elementos lineales (dos capacitores, dos resistores y un inductor), y solamente un elemento no lineal (un resistor lineal a trozos llamado diodo de Chua). La relación (I_{NR} vs V_1) del resistor lineal a trozos se observa en la Fig. 2.2.

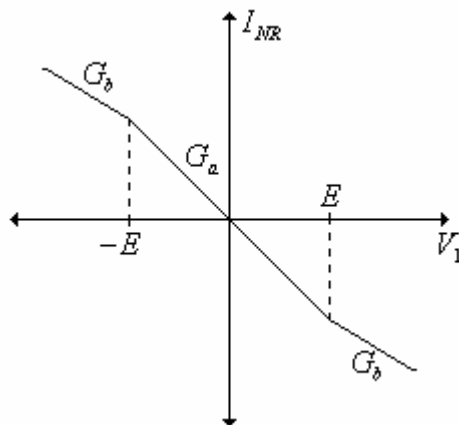


Figura 2.2 Relación Corriente Voltaje del Diodo de Chua

Agregando el resistor lineal R_0 en serie con el inductor, el circuito de Chua se vuelve canónico 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, además de que contiene el mínimo número de elementos de circuito necesarios para semejante circuito [8].

2.3.1 Ecuaciones del Circuito de Chua

Aplicando las leyes de Kirchhoff al circuito de la Fig. 2.1 obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dV_1}{dt} &= \frac{(V_2 - V_1)}{R} - f(V_1) \\ C_2 \frac{dV_2}{dt} &= \frac{(V_1 - V_2)}{R} + I_L \\ L \frac{dI_L}{dt} &= -V_2 - R_0 I_L \end{aligned} \quad (2.1)$$

con R , C_1 , C_2 , L y R_0 como los valores de los elementos del circuito y $f(V_1)$ dado como:

$$f(V_1) = G_b V_1 + 0.5(G_a - G_b) [|V_1 + E| - |V_1 - E|] \quad (2.2)$$

donde E y $-E$ son los puntos de quiebre de la relación corriente voltaje del diodo de Chua, mientras que G_a y G_b son las pendientes de la región interna y externa como se muestra en la Fig. 2.2.

El sistema de ecuaciones (2.1) tiene tres puntos de equilibrio, uno ubicado en el origen, otro se encuentra en la región $V_1 \leq -E$ y el último colocado en la región $V_1 \geq E$, los puntos de equilibrio están dados por:

$$\begin{aligned} P_- &= ((R + R_0)k, R_0 k, -k) \\ P_0 &= (0, 0, 0) \\ P_+ &= (-(R + R_0)k, -R_0 k, k) \end{aligned} \quad (2.3)$$

donde $k = \frac{E(G_a - G_b)}{1 + G_b(R + R_0)}$ y $G_b(R + R_0) \neq -1$.

La siguiente sección trata un poco de las ecuaciones adimensionadas del circuito de Chua, ya que el sistema de ecuaciones adimensionado también será modelado mediante la metodología que se describirá mas adelante.

2.3.2 Ecuaciones Adimensionadas del Circuito de Chua

Muchas veces es preferible realizar un cambio de variable en el sistema de ecuaciones (2.1), de tal forma de que se obtenga un sistema equivalente de ecuaciones más simple, o con tal de evitarnos el manejo de unidades. En el caso del sistema de ecuaciones del circuito de Chua, podemos encontrar un sistema de ecuaciones adimensionado si utilizamos las siguientes variables adimensionadas:

$$x = V_1/E, \quad y = V_2/E, \quad z = RI_L/E, \quad T = t/RC_2 \quad (2.4)$$

Utilizando las ecuaciones (2.1), (2.2) y las variables adimensionadas (2.4), obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones adimensionado:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dT} &= \alpha(y - f(x)) \\ \frac{dy}{dT} &= x - y + z \\ \frac{dz}{dT} &= -\beta y - \gamma z \end{aligned} \quad (2.5)$$

con

$$f(x) = m_1 x + 0.5(m_0 - m_1) [|x+1| - |x-1|] \quad (2.6)$$

donde $\alpha = C_2/C_1$, $m_1 = 1 + G_b R$, $m_0 = 1 + G_a R$, $\beta = R^2 C_2/L$ y $\gamma = RR_0 C_2/L$

El sistema de ecuaciones adimensionado (2.5), también tiene tres puntos de equilibrio, uno ubicado en el origen, otro se encuentra en la región

$x \leq -1$ y el último colocado en la región $x \geq 1$, los puntos de equilibrio están dados por:

$$\begin{aligned} P_- &= (-(\gamma + \beta)k, -\gamma k, \beta k) \\ P_0 &= (0, 0, 0) \\ P_+ &= ((\gamma + \beta)k, \gamma k, -\beta k) \end{aligned} \tag{2.7}$$

donde $k = \frac{m_0 - m_1}{\gamma - m_1(\gamma + \beta)}$ y $m_1(\gamma + \beta) \neq \gamma$.

Realizando un análisis similar al circuito de Chua, en la siguiente sección se estudia al circuito de Saito.

2.4 Circuito de Saito

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.

El hipercaos se define usualmente como un atractor caótico con más de un exponente de Liapunov positivo. El hipercaos no puede ser observado en los circuitos autónomos de tres dimensiones debido a que un exponente de Liapunov siempre es cero y al menos uno debe ser un exponente negativo para que sea un atractor [10]. El circuito de Saito es hipercaótico esto quiere decir que al menos dos de sus cuatro exponentes de Liapunov son positivos. Este circuito al igual que el circuito de Chua se utiliza principalmente en la transmisión y recepción de señales en los sistemas de comunicación, con la diferencia de que este circuito se comporta de una manera hipercaótica incrementando con ello la seguridad en los sistemas [9].

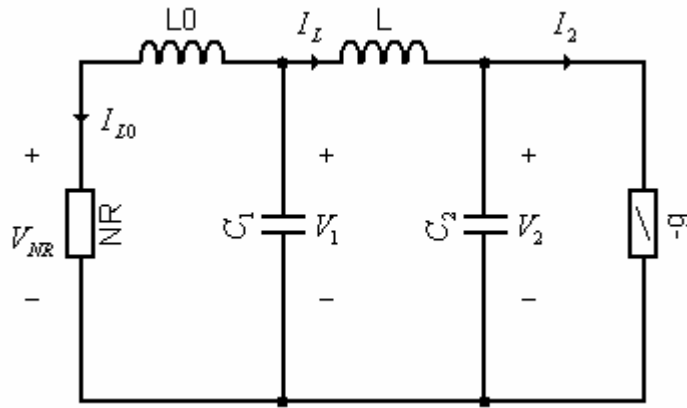


Figura 2.3 Circuito de Saito

La Fig. 2.3 muestra al circuito de Saito el cual esta compuesto de 5 elementos lineales (dos capacitores, dos inductores y un conductor negativo caracterizado por $I_2 = -g V_2$), y solamente un elemento no lineal (un resistor lineal a trozos controlado por corriente). La característica (V_{NR} vs I_{L0}) del resistor no lineal de Saito se ilustra en la Fig. 2.4.

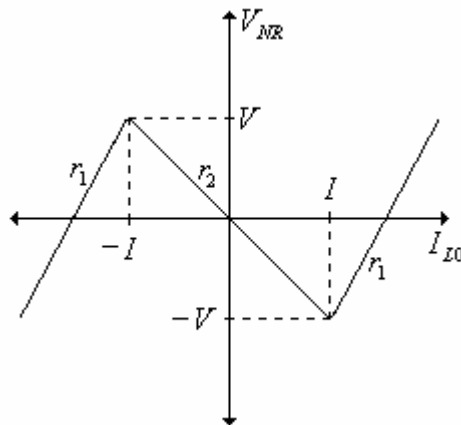


Figura 2.4 Relación Voltaje Corriente del Resistor no Lineal de Saito

Como se menciona en [10], un fenómeno interesante que ocurre en el circuito de Saito es ver como el resistor no lineal, se comporta como un resistor con histéresis.

2.4.1 Ecuaciones del Circuito de Saito

Si aplicamos las leyes de Kirchhoff al circuito de Saito de la Fig. 2.3 encontramos sus ecuaciones circuitales dadas como:

$$\begin{aligned}
 C_1 \frac{dV_1}{dt} &= -I_L - I_{L_0} \\
 C_2 \frac{dV_2}{dt} &= gV_2 + I_L \\
 L \frac{dI_L}{dt} &= V_1 - V_2 \\
 L_0 \frac{dI_{L_0}}{dt} &= V_1 - f(I_{L_0})
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

con g , C_1 , C_2 , L y L_0 como los valores de los elementos del circuito y $f(I_{L_0})$ dado como:

$$f(I_{L_0}) = r_1 I_{L_0} + 0.5(r_2 - r_1) [|I_{L_0} + I| - |I_{L_0} - I|] \tag{2.9}$$

donde I y $-I$ son los puntos de quiebre de la relación voltaje corriente del resistor no lineal de Saito, mientras que r_2 y r_1 son las pendientes de la región interna y externa como se muestra en la Fig. 2.4.

Analizando el anterior sistema de ecuaciones se encuentran tres puntos de equilibrio, uno ubicado en el origen, otro se encuentra en la región $I_{L_0} \leq -I$ y el último colocado en la región $I_{L_0} \geq I$, los puntos de equilibrio están dados por:

$$\begin{aligned}
 P_- &= (-k, -k, gk, -gk) \\
 P_0 &= (0, 0, 0, 0) \\
 P_+ &= (k, k, -gk, gk)
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

donde $k = \frac{I(r_2 - r_1)}{1 - gr_1}$ y $g \neq \frac{1}{r_1}$.

En la última sección de este capítulo se presentarán las ecuaciones adimensionadas del circuito de Saito como se hizo con el circuito de Chua.

2.4.2 Ecuaciones Adimensionadas del Circuito de Saito

Al igual que en el caso del circuito de Chua, con las ecuaciones adimensionadas del circuito de Saito se puede obtener un sistema equivalente de ecuaciones mas simple para llevar a cabo su análisis, o ya sea un sistema que nos evite el manejo de unidades. Para poder encontrar el sistema de ecuaciones adimensionado del circuito de Saito utilizamos las siguientes variables adimensionadas:

$$x = V_1/V, \quad y = V_2/V, \quad z = r_1 I_L/V, \quad w = r_1 I_{L0}/V, \quad T = t/r_1 C_1 \quad (2.11)$$

Utilizando las ecuaciones (2.8), (2.9) y las variables adimensionadas (2.11), se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones adimensionado:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dT} &= -z - w \\ \frac{dy}{dT} &= \gamma(2\delta y + z) \\ \frac{dz}{dT} &= \rho(x - y) \\ \varepsilon \frac{dw}{dT} &= x - f(w) \end{aligned} \quad (2.12)$$

con

$$f(w) = w + \frac{0.5}{r_1} (r_2 - r_1) [|w - \eta| - |w + \eta|] \quad (2.13)$$

donde $\gamma = C_1/C_2$, $2\delta = r_1 g$, $\rho = r_1^2 C_1/L$, $\varepsilon = L_0/(C_1 r_1^2)$ y $\eta = r_1/r_2$

Al analizar el sistema de ecuaciones adimensionado del circuito de Saito se encuentran tres puntos de equilibrio, uno ubicado en el origen, otro se encuentra en la región $w \leq -\eta$ y el último colocado en la región $w \geq \eta$, los puntos de equilibrio están dados por:

$$\begin{aligned}P_- &= (-k, -k, 2\delta k, -2\delta k) \\P_0 &= (0, 0, 0, 0) \\P_+ &= (k, k, -2\delta k, 2\delta k)\end{aligned}\tag{ 2.14}$$

donde $k = \frac{\eta - 1}{1 - 2\delta}$ y $2\delta \neq 1$.

Con este tema se concluye el capítulo 2 y se da paso al capítulo 3, en el cual se estudiarán las CNNs y las SC-CNNs. En especial se hace énfasis en las SC-CNNs, ya que estas son nuestro bloque básico de construcción de nuestros circuitos caóticos.

Capítulo 3

CNNs y SC-CNNs

3.1 Introducción

Después de haber realizado el análisis de los circuitos de Chua y de Saito, el siguiente paso es estudiar la manera en que operan las Redes Neuronales Celulares (CNNs) y las Redes Neuronales Celulares de Estado Controlado (SC-CNNs). En este capítulo se estudiará el funcionamiento de las CNNs, se darán algunas definiciones fundamentales de las mismas, se ilustrará la composición interna del circuito de una celda de una CNN y se describirán las ecuaciones del circuito de la celda. De manera similar en el caso de las SC-CNNs se mencionan algunas definiciones fundamentales y se muestran el circuito y las ecuaciones del circuito que describen su comportamiento. Además se describe la diferencia que existe entre las CNNs y las SC-CNNs.

Se puede notar que en nuestro caso se utilizarán las SC-CNNs para realizar el modelado de los circuitos caóticos de Chua y de Saito, por tanto se debe poner especial atención en el análisis que describe el comportamiento de las SC-CNNs.

3.2 Redes Neuronales Celulares (CNNs)

Las Redes Neuronales Celulares fueron introducidas por Leon O. Chua y Lin Yang en 1988. Las CNNs son arreglos de celdas que forman procesadores analógicos, con valores de señales de tiempo continuo e interacciones locales dentro de un radio finito [3].

Las CNNs están basadas en las redes neuronales, las cuales están inspiradas en algunos aspectos de neurobiología. Las principales características de redes neuronales son procesamiento paralelo asíncrono, dinámica de tiempo continuo e interacción global de los elementos de la red. Al igual que una red neuronal, la CNN es un circuito analógico no lineal a gran escala que procesa señales en tiempo real. Al igual que un autómata celular, esta compuesto de un agregado masivo de circuitos clones distribuidos regularmente, llamados celdas, las cuales se comunican entre si solamente a través de sus vecinos mas cercanos. Las CNNs comparten las mejores características de los dominios analógico y digital; su característica de tiempo continuo le permite el procesamiento de señales en tiempo real, mientras que su característica de interconexión local las hace hechas a la medida para la implementación VLSI [1].

Al principio, la mayoría de las aplicaciones de CNNs se concentraba en el procesamiento de imágenes y reconocimiento de patrones [2]. Pero a medida que ha transcurrido el tiempo se han encontrado nuevas aplicaciones como: análisis de superficies 3D, solución de ecuaciones diferenciales parciales, compresión de imágenes, detección de objetos en movimientos, detección de anomalías en el cerebro, modelado de visión biológica, entre muchas otras. Estos son solo algunos pequeños ejemplos de lo que se ha podido realizar con el uso de CNNs y cada vez son más las aplicaciones que se generan en diferentes áreas del conocimiento.

3.2.1 Definiciones Fundamentales de CNNs

Existen algunas definiciones fundamentales con las cuales se describe de manera general el comportamiento de las CNNs [22]. En esta sección se presentan algunas de esas definiciones fundamentales.

Definición 1: Arquitectura Estándar de una CNN

Una arquitectura estándar de una CNN Fig. 3.1, consiste de un arreglo rectangular de $M \times N$ celdas $C(i, j)$, con coordenadas cartesianas (i, j) , donde $i = 1, 2, \dots, M$ y $j = 1, 2, \dots, N$.

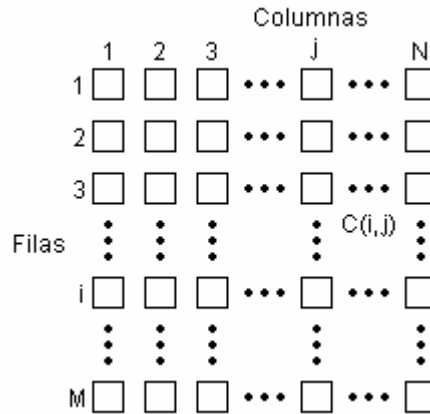


Figura 3.1 Arquitectura Estándar de una CNN

Como una observación para esta definición, es necesario resaltar que existen varias aplicaciones en las cuales $M \neq N$, por ejemplo, para realizar un escáner, fax o copiadora, es mas apropiada una CNN de 5×512 .

Definición 2: Esfera de Influencia de la celda $C(i, j)$

La esfera de influencia $S_r(i, j)$ de radio r de la celda $C(i, j)$, esta definida para ser el conjunto de todas las celdas vecinas que satisfacen la siguiente propiedad:

$$S_r(i, j) = \{C(k, l) \mid \max_{1 \leq k \leq M, 1 \leq l \leq N} (|k - i|, |l - j|) \leq r\} \quad (3.1)$$

donde r es un entero positivo.

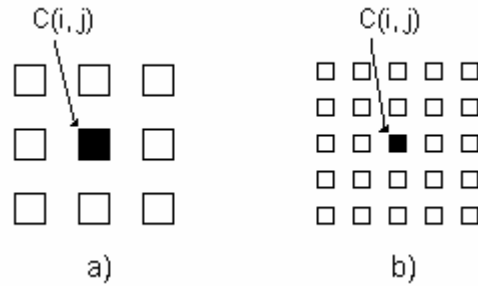


Figura 3.2 a) Vecindad de 3×3 ($r=1$), b) Vecindad de 5×5 ($r=2$)

Otra forma de referirse a $S_r(i, j)$ es como una vecindad de $(2r+1) \times (2r+1)$. Algunos ejemplos de vecindades se muestran para $r=1$ Fig. 3.2(a), o vecindad de 3×3 y para $r=2$ Fig. 3.2(b), o vecindad de 5×5 .

Definición 3: Celdas Regulares y Celdas Límite

Una celda $C(i, j)$ es llamada celda regular con respecto a $S_r(i, j)$, si y solo si todas las celdas vecinas $C(k, l) \in S_r(i, j)$. De otra manera, $C(i, j)$ es llamada una celda límite Fig. 3.3.

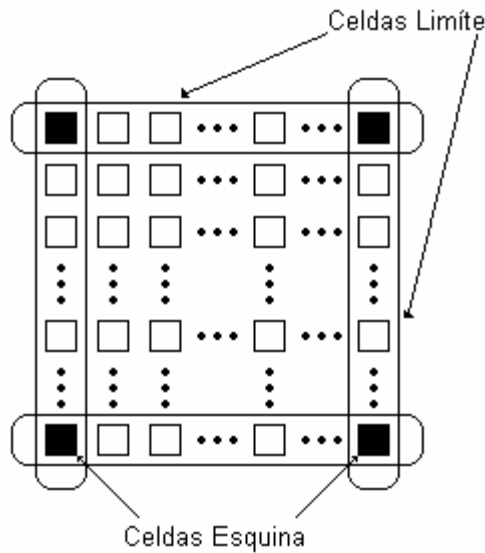


Figura 3.3 Celdas Límite y Celdas Esquina

Las celdas límite exteriores son llamadas celdas borde. Si $r > 1$, entonces no todas las celdas límite son celdas borde.

Definición 4: CNN isotrópica o de espacio invariante

Una CNN es isotrópica o de espacio invariante si y solo si los operadores $A(i, j; k, l)$, $B(i, j; k, l)$ y el umbral I_{ij} no varían con el espacio.

3.2.2 Circuito de la Celda de una CNN

En [1], se describe un ejemplo típico de una celda $C(i, j)$ de una red neuronal celular el cual se ilustra en la Fig. 3.4, donde los sufijos u , x , y y denotan la entrada, estado y salida respectivamente. El nodo de voltaje V_{xij} de $C(i, j)$ es el estado de la celda y su condición inicial debe ser menor o igual a uno. El nodo de voltaje V_{uij} es la entrada de $C(i, j)$ y se asume que debe ser una constante menor o igual a uno. Por último, el nodo de voltaje V_{yij} es la salida de la celda.

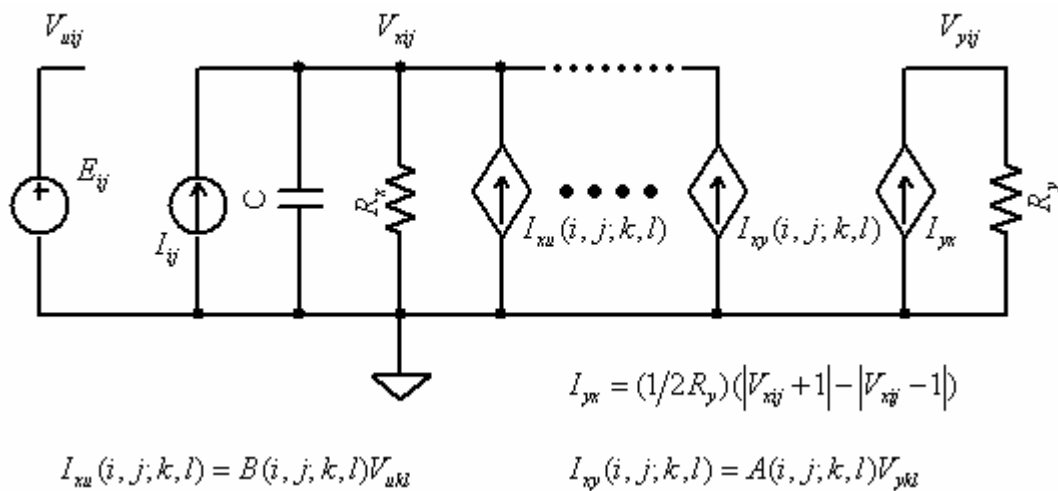


Figura 3.4 Circuito de la Celda de una CNN

En la Fig. 3.4, podemos ver que cada celda $C(i, j)$ de una CNN esta formada por una fuente de voltaje independiente E_{ij} , una fuente de corriente independiente I_{ij} , un capacitor lineal C , dos resistores lineales R_x y R_y , y $2m$ fuentes de corriente controladas por voltaje, las cuales están acopladas a sus celdas vecinas por medio del voltaje de control de entrada V_{ukl} y la retroalimentación del voltaje de salida V_{ykl} de cada celda vecina $C(k, l)$, donde m es igual al número de celdas vecinas. En particular $I_{xy}(i, j; k, l)$ y $I_{xu}(i, j; k, l)$ son fuentes de corriente controladas por voltaje con la característica de que $I_{xy}(i, j; k, l) = A(i, j; k, l)V_{ykl}$ y $I_{xu}(i, j; k, l) = B(i, j; k, l)V_{ukl}$ para toda $C(k, l) \in S_r(i, j)$. El efecto de retroalimentación de salida depende del parámetro interactivo $A(i, j; k, l)$ y el efecto de control de entrada depende de $B(i, j; k, l)$, a estos parámetros se les conoce como patrones de clonado.

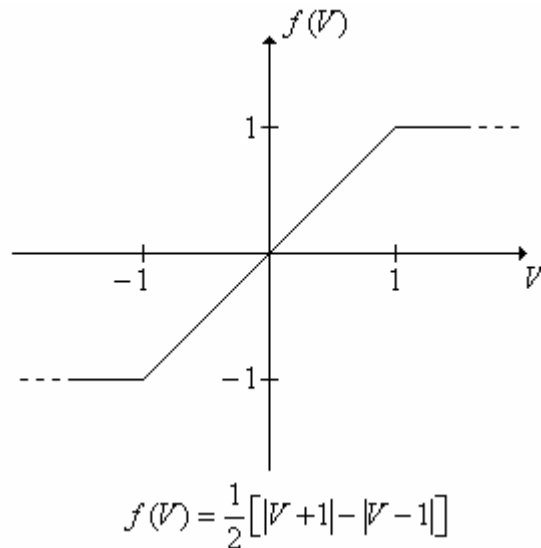


Figura 3.5 Característica de la Fuente Controlada No Lineal

El único elemento no lineal en cada celda es una fuente de corriente controlada por voltaje lineal a trozos $I_{yx} = (1/R_y)f(V_{xij})$ con la característica de la fuente controlada no lineal que se muestra en la Fig. 3.5.

3.2.3 Ecuaciones del Circuito de la Celda de una CNN

Aplicando las leyes de Kirchhoff al circuito de la Fig. 3.4, se encuentran fácilmente las ecuaciones de la celda de una CNN [1].

Ecuación de Estado:

$$C \frac{dV_{xij}(t)}{dt} = -\frac{V_{xij}(t)}{R_x} + \sum_{C(k,l) \in \mathcal{S}_r(i,j)} A(i, j; k, l) V_{ykl}(t) + \sum_{C(k,l) \in \mathcal{S}_r(i,j)} B(i, j; k, l) V_{ukl}(t) + I_{ij} \quad (3.2)$$

con $1 \leq i \leq M$; $1 \leq j \leq N$.

Ecuación de Salida:

$$V_{yij}(t) = \frac{1}{2} \left[|V_{xij}(t) + 1| - |V_{xij}(t) - 1| \right] \quad (3.3)$$

con $1 \leq i \leq M$; $1 \leq j \leq N$.

Ecuación de Entrada:

$$V_{uij} = E_{ij} \quad (3.4)$$

con $1 \leq i \leq M$; $1 \leq j \leq N$.

Condiciones Limitantes:

$$\begin{aligned} |V_{xij}(0)| &\leq 1 \\ |V_{uij}| &\leq 1 \end{aligned} \quad (3.5)$$

con $1 \leq i \leq M$; $1 \leq j \leq N$.

En la práctica, la magnitud de las señales pueden ser normalizadas para satisfacer estas condiciones.

Suposición de Parámetros:

$$\begin{aligned} A(i, j; k, l) &= A(k, l; i, j) \\ 1 \leq i, k \leq M; 1 \leq j, l \leq N \\ C > 0, R_x > 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Es importante tener presente que las celdas que componen una red neuronal celular tienen la misma estructura de circuito y valores de elementos.

3.3 Redes Neuronales Celulares de Estado Controlado (SC-CNNs)

Una relativamente reciente generalización de las redes neuronales celulares (CNNs) son las redes neuronales celulares de estado controlado (SC-CNNs). El nombre de este modelo SC-CNN es debido al hecho de que es básicamente igual al modelo de la CNN lineal, con la adición del patrón de estado.

Se ha demostrado que este nuevo modelo CNN es capaz de generar la dinámica de circuitos caóticos no lineales; entre los que destacan el Oscilador de Chua [6], Oscilador de Colpitts [11], el generador de caos de histéresis de Saito [9], e incluso generar n-doble scrolls por medio del circuito de Chua con la respectiva modificación del diodo de Chua [12].

Con la generación de señales caóticas e hipercaóticas mediante el uso de SC-CNNs, se han utilizado estas señales en sistemas de comunicaciones, específicamente en comunicaciones caóticas para realizar transmisiones seguras. En muchos casos se ha preferido la utilización de SC-CNNs en comunicaciones caóticas por el hecho de que pueden ser programadas digitalmente, es decir la codificación de los mensajes puede ser seleccionada o cambiada fácilmente [9].

3.3.1 Definiciones Fundamentales de SC-CNNs

Tomando en cuenta los aspectos de generalización, en el caso de las SC-CNNs la mayoría de las definiciones fundamentales vienen siendo las mismas que las de las CNNs y por tanto solo se agrega la definición fundamental de una SC-CNN lineal [11].

Definición 1: SC-CNN lineal

La red neuronal celular de estado controlado lineal (SC-CNN lineal) es un arreglo de sistemas dinámicos no lineales descritos por la siguiente ecuación de estado:

$$C \frac{dV_{xij}(t)}{dt} = -\frac{V_{xij}(t)}{R_x} + \sum_{C(k,l) \in S_r(i,j)} \{A(i,j;k,l)V_{ykl}(t) + B(i,j;k,l)V_{ukl}(t) + C(i,j;k,l)V_{xkl}(t)\} + I_{ij} \quad (3.7)$$

con $V_{yij}(t) = \frac{1}{2} [|V_{xij}(t) + 1| - |V_{xij}(t) - 1|]$ y donde $1 \leq i \leq M$; $1 \leq j \leq N$.

3.3.2 Circuito de la Celda de una SC-CNN

Como se mencionó anteriormente, las SC-CNNs son una generalización de las CNNs que se describen en [1], por tanto la descripción de la celda de una SC-CNN es casi la misma que la de una CNN, la única diferencia es la inclusión de una fuente de corriente controlada por el voltaje de estado como se bosqueja en la Fig. 3.6.

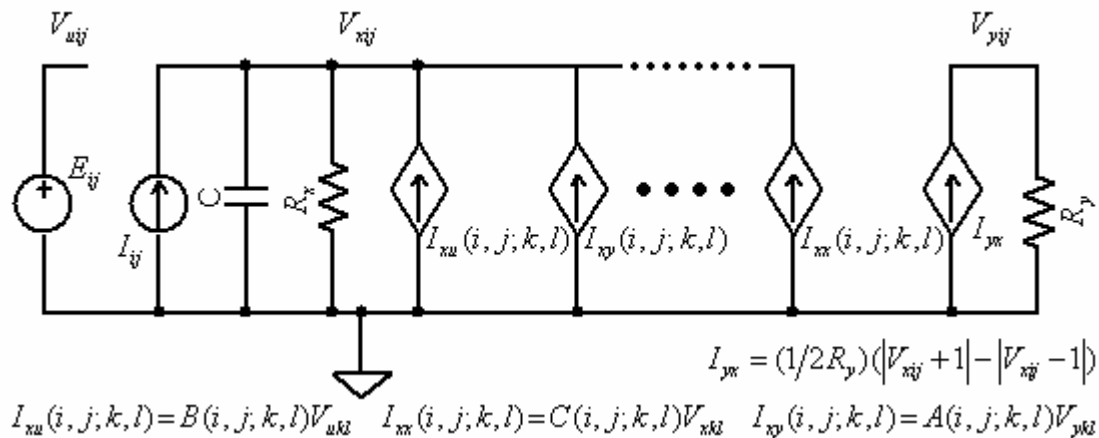


Figura 3.6 Circuito de la Celda de una SC-CNN

De la Fig. 3.6, se puede observar que la SC-CNN esta conformada por los mismos elementos que una CNN, además de la fuente $I_{xx}(i, j; k, l)$ cuya característica esta dada por $I_{xx}(i, j; k, l) = C(i, j; k, l)V_{xkl}$, pero en este caso ahora se tienen $3m$ fuentes de corriente controladas por voltaje, las cuales están acopladas a sus celdas vecinas por medio del voltaje de control de entrada V_{ukl} , el voltaje de estado V_{xkl} y la retroalimentación del voltaje de salida V_{ykl} de cada celda vecina $C(k, l)$, donde m es igual al número de celdas vecinas. Además se agrega un nuevo patrón de clonado $C(i, j; k, l)$, también llamado patrón de estado.

La SC-CNN también conserva el único elemento no lineal en cada celda, el cual es una fuente de corriente controlada por voltaje lineal a trozos $I_{yx} = (1/R_y)f(V_{xij})$.

3.3.3 Ecuaciones del Circuito de la Celda de una SC-CNN

Aplicando las leyes de Kirchhoff al circuito de la Fig. 3.6, se encuentran las ecuaciones de la celda de una SC-CNN.

Ecuación de Estado:

$$C \frac{dV_{xij}(t)}{dt} = -\frac{V_{xij}(t)}{R_x} + \sum_{C(k,l) \in S_r(i,j)} \left\{ A(i, j; k, l)V_{ykl}(t) + B(i, j; k, l)V_{ukl}(t) + C(i, j; k, l)V_{xkl}(t) \right\} + I_{ij} \quad (3.8)$$

con $1 \leq i \leq M$; $1 \leq j \leq N$.

Ecuación de Salida:

$$V_{yij}(t) = \frac{1}{2} \left[|V_{xij}(t) + 1| - |V_{xij}(t) - 1| \right] \quad (3.9)$$

con $1 \leq i \leq M$; $1 \leq j \leq N$.

Ecuación de Entrada:

$$V_{uij} = E_{ij} \quad (3.10)$$

con $1 \leq i \leq M ; 1 \leq j \leq N$.

Condiciones Limitantes:

$$\begin{aligned} |V_{xij}(0)| &\leq 1 \\ |V_{uij}| &\leq 1 \end{aligned} \quad (3.11)$$

con $1 \leq i \leq M ; 1 \leq j \leq N$.

En la práctica, la magnitud de las señales pueden ser normalizadas para satisfacer estas condiciones.

Suposición de Parámetros:

$$\begin{aligned} A(i, j; k, l) &= A(k, l; i, j) \\ 1 \leq i, k \leq M; 1 \leq j, l \leq N \\ C > 0, R_x > 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Si se examina el circuito de la celda de una SC-CNN, se puede ver que es prácticamente el mismo que el de una CNN, y por tanto, sus ecuaciones sufren muy pocos cambios.

Capítulo 4

Modelado de una Clase de Circuitos Caóticos Mediante el uso de SC-CNNs

4.1 Introducción

En este capítulo se describe la metodología para el modelado comportamental de una clase de circuitos caóticos que utilizan a la SC-CNN como su bloque básico de construcción.

La primera sección trata sobre el modelo generalizado de una SC-CNN el cual es aplicado comúnmente en arquitecturas rectangulares, y del cual se deduce otro modelo que es aplicado en arreglos de filas cuyos patrones de control son igual a cero ($B_{i;k} = 0$). Este último modelo es el que se emplea para el modelado comportamental, y por tanto, nos indica que clase de circuitos caóticos pueden ser realizados con él.

La segunda sección del capítulo describe la metodología para modelar circuitos caóticos, y cuyos pasos son: definición de las ecuaciones de estado, simulación de las ecuaciones de estado en MATLAB, obtención de los patrones de retroalimentación y de estado de las SC-CNNs, modelado de las ecuaciones de estado mediante SC-CNNs y comparación de resultados.

4.2 Modelo Generalizado de una Celda SC-CNN

El modelo generalizado de una celda SC-CNN es el ilustrado en la Fig. 3.6 y esta descrito principalmente por las ecuaciones (3.8) y (3.9). Este modelo es aplicado comúnmente en arquitecturas con arreglos rectangular de $M \times N$ celdas $C(i, j)$, con coordenadas cartesianas (i, j) .

Existen muchas aplicaciones en donde no es necesario el uso de una arquitectura con arreglo rectangular, para estos casos solo necesitamos un arreglo de M filas de celdas $C(i)$, con coordenada cartesiana (i) .

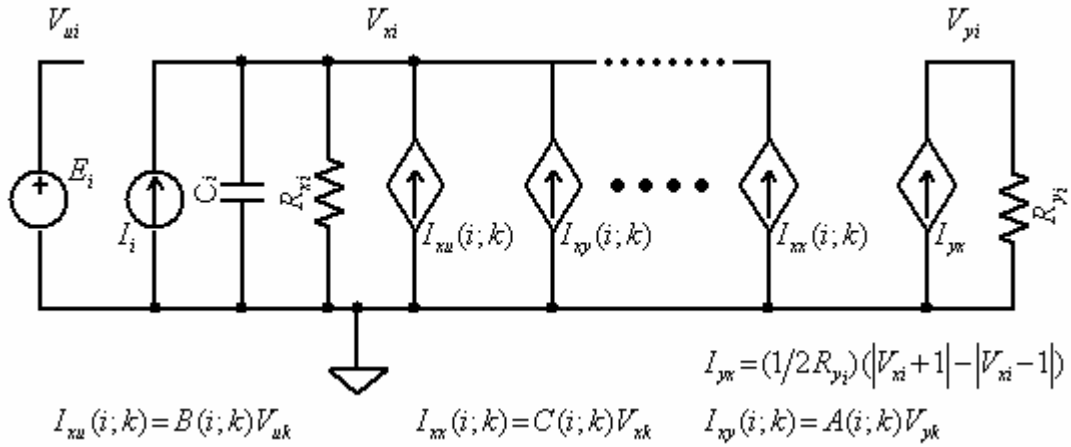


Figura 4.1 Modelo Generalizado de la Celda $C(i)$ de una SC-CNN

En esta situación se redefine a la SC-CNN Fig. 4.1, como un arreglo de $C(i)$ circuitos no lineales con la siguiente ecuación de estado:

$$C_i \frac{dV_{xi}(t)}{dt} = -\frac{V_{xi}(t)}{R_{xi}} + \sum_{C(k) \in S_r(i)} \{A(i;k)V_{yk}(t) + B(i;k)V_{uk}(t) + C(i;k)V_{xk}(t)\} + I_i \quad (4.1)$$

con $1 \leq i \leq M$.

Y con la siguiente ecuación de salida:

$$V_{yi}(t) = \frac{1}{2} [|V_{xi}(t) + 1| - |V_{xi}(t) - 1|] \quad (4.2)$$

donde los subíndices x_i , y_i y u_i indican que son las variables de estado, salida y entrada de la celda $C(i)$, M es el numero de celdas, $S_{r(i)}$ es el conjunto vecindad de la celda $C(i)$ e I_i la polarización. Por otro lado, $A(i;k) = A_{i;k}$, $B(i;k) = B_{i;k}$ y $C(i;k) = C_{i;k}$ son constantes reales llamadas patrón de retroalimentación, patrón de control y patrón de estado [17].

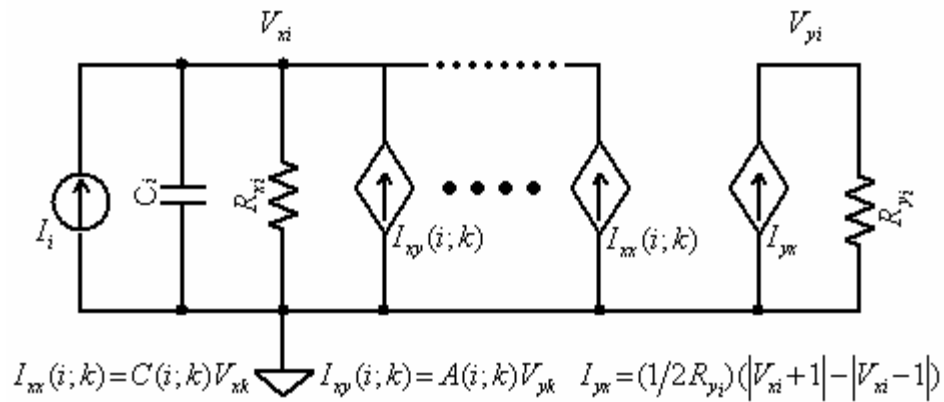


Figura 4.2 Modelo Generalizado de la Celda $C(i)$ de una SC-CNN con $B_{i;k} = 0$

En nuestro caso, nos interesa el modelo generalizado SC-CNN con $B_{i;k} = 0$ ilustrado en la Fig. 4.2, ya que es el modelo que se utiliza en el presente trabajo para modelar cierta clase de circuitos caóticos de la forma:

$$C_i \frac{dV_{xi}(t)}{dt} = -\frac{V_{xi}(t)}{R_{xi}} + \sum_{C(k) \in S_r(i)} \{A_{i;k}V_{yk}(t) + C_{i;k}V_{xk}(t)\} + I_i \quad (4.3)$$

Examinando cuidadosamente las ecuaciones de estado del circuito de Chua y del circuito de Saito, se puede ver claramente que tienen esta forma, y por ende son los ejemplos seleccionados para aplicarles el modelado comportamental mediante SC-CNNs y verificar su funcionamiento.

4.3 Metodología del Modelado Comportamental Mediante SC-CNNs

La metodología utilizada para modelar a cierta clase de circuitos caóticos, es una metodología top-down, ya que primero se modelan las ecuaciones del sistema con ayuda de MATLAB, y con ello, se obtienen los valores adecuados de los parámetros del sistemas que generan el comportamiento caótico.

Dependiendo de los valores de los parámetros obtenidos del sistema caótico, se eligen los valores de los patrones de estado y retroalimentación de las SC-CNNs, y mediante el uso del modelo generalizado de una celda SC-CNN y los patrones elegidos se reproduce el sistema caótico. Finalmente ya que se estableció el sistema caótico mediante el uso de SC-CNNs se simula en HSPICE para verificar y comparar su comportamiento con el sistema simulado en MATLAB.

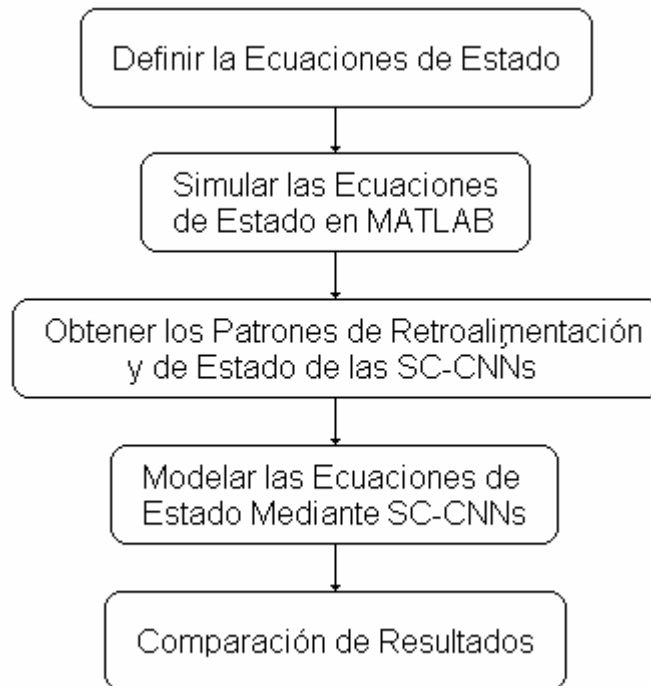


Figura 4.3 Metodología del Modelado Comportamental Mediante SC-CNNs

Se puede resumir de manera general la metodología del modelado comportamental de una clase de circuitos caóticos mediante el uso de SC-CNNs como se ilustra en la Fig. 4.2.

4.3.1 Definición de las Ecuaciones de Estado

El primer paso para modelar cierta clase de circuitos caóticos mediante el uso de SC-CNNs es tener bien definidas las ecuaciones de estado, ya sean dimensionadas o adimensionadas. Específicamente se tiene que asegurar que tengan la forma descrita en (4.3).

En el caso de nuestros ejemplos, las ecuaciones de estado dimensionadas están definidas por (2.1) y (2.8), mientras que las ecuaciones de estado adimensionadas están definidas por (2.5) y (2.12) y en ambos casos las ecuaciones tienen la forma (4.3).

4.3.2 Simulación de las Ecuaciones de Estado en MATLAB

Después de haber establecido las ecuaciones de estado de los sistemas, es necesario analizar y obtener los parámetros del sistema que generan el comportamiento caótico de los circuitos. Para la simulación en MATLAB en los casos de las ecuaciones de estado adimensionadas se debe tener cuidado en especificar las relaciones que se obtienen al realizar el cambio de variable.

4.3.3 Obtención de los Patrones de Retroalimentación y de Estado de las SC-CNNs

Con ayuda del modelo SC-CNN con $B_{i;k} = 0$, se despliega la ecuación de estado (4.3) junto con todos sus parámetros y se iguala término a término con los parámetros de las ecuaciones de los circuitos caóticos, ya sea el circuito de Chua, el circuito Saito o cualquier otro circuito que tenga la forma (4.3).

Se empieza mostrando el caso del circuito de Chua, el cual tiene tres ecuaciones de estado y por ende, tres celdas SC-CNNs. Primero desplegamos la ecuación de estado (4.3) del modelo SC-CNN con sus tres fuentes de corriente controladas por los voltajes de estado y sus 3 fuentes de corriente controladas por los voltajes de salida. La ecuación de estado de cada celda esta dada por:

$$C_1 \frac{dV_{x_i}(t)}{dt} = -\frac{V_{x_i}(t)}{R_{x_i}} + A_{i;1}V_{y_1}(t) + A_{i;2}V_{y_2}(t) + A_{i;3}V_{y_3}(t) + C_{i;1}V_{x_1}(t) + C_{i;2}V_{x_2}(t) + C_{i;3}V_{x_3}(t) + I_i \quad (4.4)$$

Ahora se comparan las ecuaciones de estado (4.4) término a término con (2.1) y se obtienen los parámetros para la primera, segunda y tercera celda como:

$$\begin{aligned} A_{1;1} &= -(G_a - G_b), A_{1;2} = 0, A_{1;3} = 0, C_{1;1} = -G_b, C_{1;2} = \frac{1}{R}, C_{1;3} = 0 \\ A_{2;1} &= 0, A_{2;2} = 0, A_{2;3} = 0, C_{2;1} = \frac{1}{R}, C_{2;2} = 0, C_{2;3} = 1 \\ A_{3;1} &= 0, A_{3;2} = 0, A_{3;3} = 0, C_{3;1} = 0, C_{3;2} = -\frac{1}{RR_0}, C_{3;3} = 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

donde $V_{x_1} = V_1$, $V_{x_2} = V_2$, $V_{x_3} = I_L$, $R_{x_1} = R_{x_2} = R_{x_3} = R$, $R_{y_1} = 1k$, $R_{y_2} = R_{y_3} = 0$,

$$I_1 = I_2 = I_3 = 0, C_1 = 10n, C_2 = 100n \text{ y } C_3 = \frac{L}{RR_0}.$$

De manera similar igualando las ecuaciones de estado (4.4) término a término con las ecuaciones del circuito adimensionado de Chua (2.5) se obtienen los parámetros:

$$\begin{aligned}
 A_{1;1} &= -\alpha C_1(m_0 - m_1), A_{1;2} = 0, A_{1;3} = 0, C_{1;1} = -\alpha C_1 m_1, C_{1;2} = \alpha C_1, C_{1;3} = 0 \\
 A_{2;1} &= 0, A_{2;2} = 0, A_{2;3} = 0, C_{2;1} = C_2, C_{2;2} = -C_2, C_{2;3} = C_2 \\
 A_{3;1} &= 0, A_{3;2} = 0, A_{3;3} = 0, C_{3;1} = 0, C_{3;2} = -\beta C_3, C_{3;3} = 0
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

donde $V_{x1} = x$, $V_{x2} = y$, $V_{x3} = z$, $R_{x1} = R_{x2} = 0$, $R_{x3} = R$, $R_{y1} = 1k$, $R_{y2} = R_{y3} = 0$,

$$I_1 = I_2 = I_3 = 0, C_1 = 10n, C_2 = 100n \text{ y } C_3 = \frac{1}{\gamma R}.$$

Siguiendo el mismo procedimiento para el circuito de Saito se tiene:

$$\begin{aligned}
 C_i \frac{dV_{xi}(t)}{dt} &= -\frac{V_{xi}(t)}{R_{xi}} + A_{i;1}V_{y1}(t) + A_{i;2}V_{y2}(t) + A_{i;3}V_{y3}(t) + A_{i;4}V_{y4}(t) \\
 &+ C_{i;1}V_{x1}(t) + C_{i;2}V_{x2}(t) + C_{i;3}V_{x3}(t) + C_{i;4}V_{x4}(t) + I_i
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

$$\begin{aligned}
 A_{1;1} &= 0, A_{1;2} = 0, A_{1;3} = 0, A_{1;4} = 0, C_{1;1} = 0, C_{1;2} = 0, C_{1;3} = -1, C_{1;4} = -1 \\
 A_{2;1} &= 0, A_{2;2} = 0, A_{2;3} = 0, A_{2;4} = 0, C_{2;1} = 0, C_{2;2} = g, C_{2;3} = 1, C_{2;4} = 0 \\
 A_{3;1} &= 0, A_{3;2} = 0, A_{3;3} = 0, A_{3;4} = 0, C_{3;1} = \frac{C_3}{L}, C_{3;2} = -\frac{C_3}{L}, C_{3;3} = 0, C_{3;4} = 0 \\
 A_{4;1} &= 0, A_{4;2} = 0, A_{4;3} = 0, A_{4;4} = -\frac{g(r_2 - r_1)}{r_1}, C_{4;1} = \frac{g}{r_1}, C_{4;2} = 0, C_{4;3} = 0, C_{4;4} = 0
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

donde $V_{x1} = V_1$, $V_{x2} = V_2$, $V_{x3} = I_L$, $V_{x4} = I_{L0}$, $R_{x1} = R_{x2} = R_{x3} = 0$, $R_{x4} = 5.128k$,

$R_{y1} = R_{y2} = R_{y3} = 0$, $R_{y4} = 1k$, $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 0$, $C_1 = C_2 = 39n$, $C_3 = 10u$ y

$$C_4 = \frac{gL_0}{r_1}.$$

De igual forma para el circuito de Saito adimensionado tenemos:

$$\begin{aligned}
 A_{1;1} &= 0, A_{1;2} = 0, A_{1;3} = 0, A_{1;4} = 0, C_{1;1} = 0, C_{1;2} = 0, C_{1;3} = -C_1, C_{1;4} = -C_1 \\
 A_{2;1} &= 0, A_{2;2} = 0, A_{2;3} = 0, A_{2;4} = 0, C_{2;1} = 0, C_{2;2} = 2\delta\gamma C_2, C_{2;3} = \gamma C_2, C_{2;4} = 0 \\
 A_{3;1} &= 0, A_{3;2} = 0, A_{3;3} = 0, A_{3;4} = 0, C_{3;1} = \rho C_3, C_{3;2} = -\rho C_3, C_{3;3} = 0, C_{3;4} = 0 \\
 A_{4;1} &= 0, A_{4;2} = 0, A_{4;3} = 0, A_{4;4} = 2g, C_{4;1} = g, C_{4;2} = 0, C_{4;3} = 0, C_{4;4} = 0
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

donde $V_{x1} = x$, $V_{x2} = y$, $V_{x3} = z$, $V_{x4} = w$, $R_{x1} = R_{x2} = R_{x3} = 0$, $R_{x4} = 5.128k$,
 $R_{y1} = R_{y2} = R_{y3} = 0$, $R_{y4} = 1k$, $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 0$, $C_1 = C_2 = 39n$, $C_3 = 10u$ y
 $C_4 = g\varepsilon$.

4.3.4 Modelado de las Ecuaciones de Estado Mediante SC-CNNs

Para este punto necesitamos la ayuda del apéndice A, donde se describe como esta conformado un subcircuito de una celda SC-CNN dependiendo del número de celdas, y se explica la sintaxis del subcircuito que modela a una SC-CNN. Utilizando esta sintaxis y los valores de los patrones de retroalimentación y de estado, se representa y simula en HSPICE a cada uno de los circuitos de Chua y de Saito.

4.3.5 Comparación de Resultados

Por último, se muestran y comparan los resultados obtenidos en MATLAB con los resultados obtenidos en HSPICE, con el fin de verificar que los resultados sean los mismos.

Capítulo 5

Casos de Estudio

5.1 Introducción

A continuación se presentan los casos de estudio a los cuales se les aplicó el modelado comportamental mediante SC-CNNs, es decir, se presentan los resultados del modelado comportamental de los circuitos caóticos de Chua y de Saito.

Aplicando la metodología a los casos de estudio, lo primero que se realiza es la definición de las ecuaciones de estado que caracterizan a los circuitos. Siguiendo con el procedimiento, se simulan las ecuaciones de estado con ayuda de MATLAB para obtener los parámetros que generan el comportamiento caótico. Estos parámetros y simulaciones son parte de los resultados que se muestran en este capítulo.

Utilizando las ecuaciones de estado con sus respectivos parámetros caóticos, y comparándolas con el modelo de las SC-CNNs, se obtiene la representación de las ecuaciones de estado de los circuitos caóticos mediante celdas SC-CNNs. En este capítulo no podían faltar los resultados de las simulaciones en HSPICE de las celdas SC-CNNs, las cuales representan el modelado comportamental de los circuitos caóticos.

5.2 Análisis Transitorio del Circuito de Chua

De acuerdo a la metodología de modelado lo primero que se debe realizar es simular en MATLAB las ecuaciones de estado.

En la tabla 5.1 se presentan los valores de los elementos del circuito de Chua que generan el comportamiento caótico.

Tabla 5.1 Valores de los Elementos del Circuito de Chua que Generan Caos

Elemento	Valor
R	$1.78k\Omega$
R_0	12.5Ω
C_1	$10nF$
C_2	$100nF$
L	$18mH$
E	$1V$
g_a	$-757e^{-6}$
g_b	$-409e^{-6}$

Mientras tanto, en la Fig. 5.1 se presenta el análisis transitorio de los voltajes de los capacitores V_1 , V_2 y la corriente en el inductor I_L con los elementos del circuito de Chua que generan caos. Debido al comportamiento caótico del circuito, se puede notar un comportamiento impredecible de V_1 , V_2 e I_L

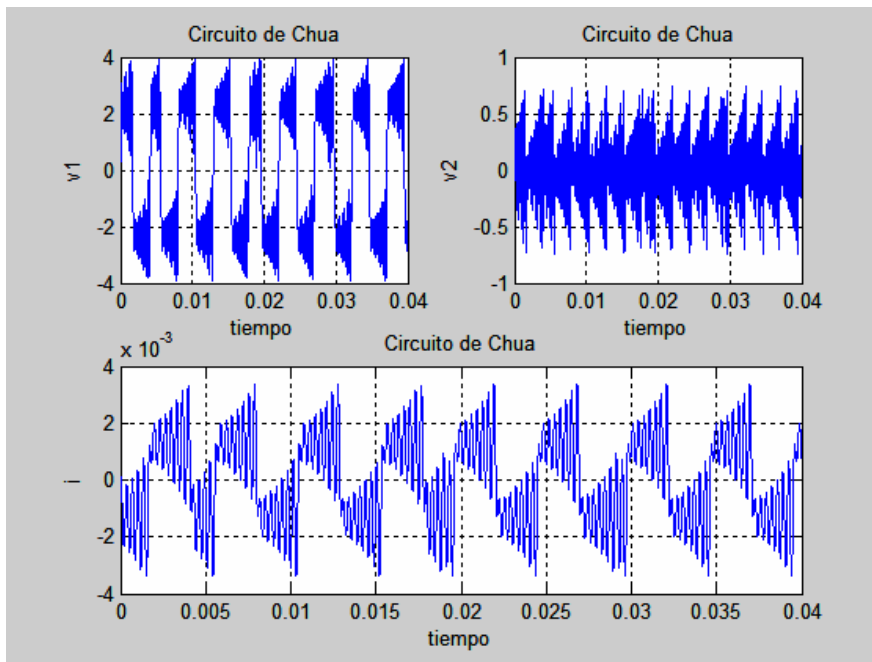


Figura 5.1 Respuesta Transitoria de los Voltajes V_1 , V_2 e I_L del Circuito de Chua

La Fig. 5.2 muestra el atractor de doble scroll del circuito de Chua en el espacio de fase ($V_2 - V_1$).

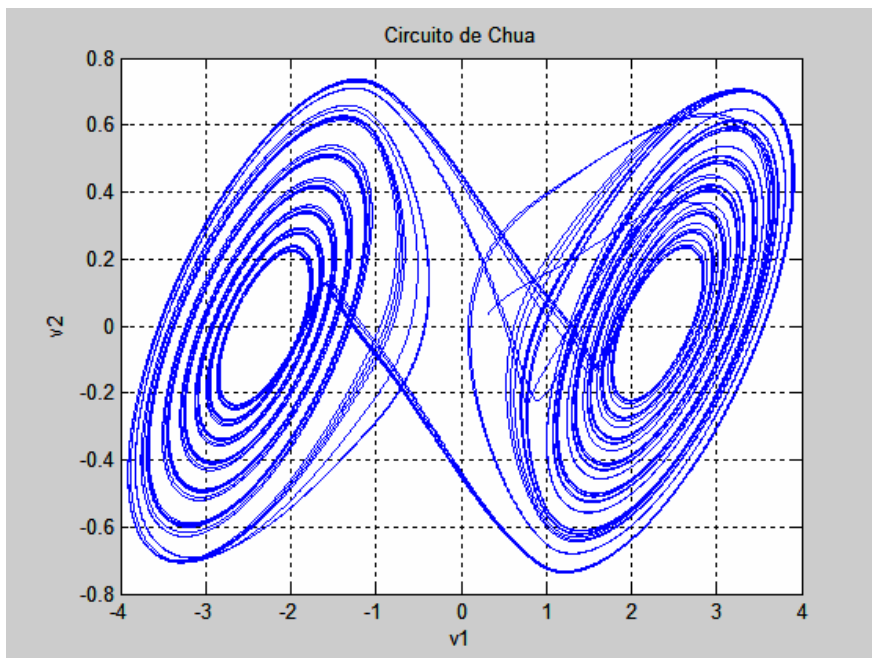


Figura 5.2 Atractor de Doble Scroll del Circuito de Chua en el Espacio de Fase V_2-V_1

La respuesta en tres dimensiones del atractor de doble scroll del Circuito de Chua se ilustra en la Fig. 5.3.

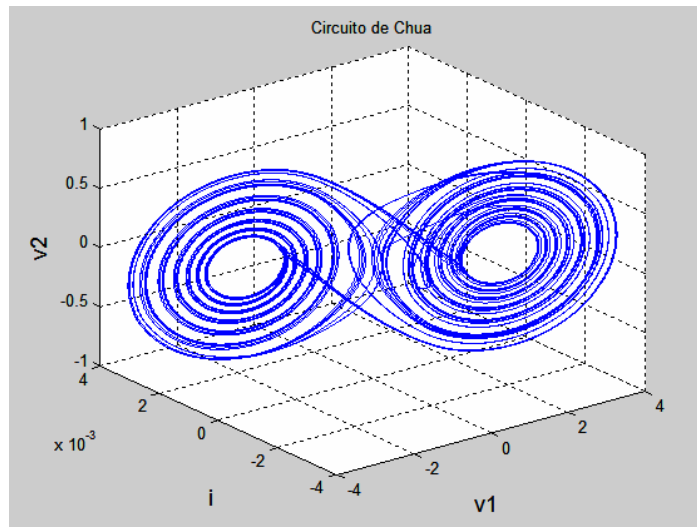


Figura 5.3 Atractor de Doble Scroll en el Circuito de Chua

El penúltimo paso del modelado de circuitos caóticos es la simulación en HSPICE. La respuesta transiente en HSPICE del Circuito de Chua esta dada como se muestra en la Fig. 5.4.

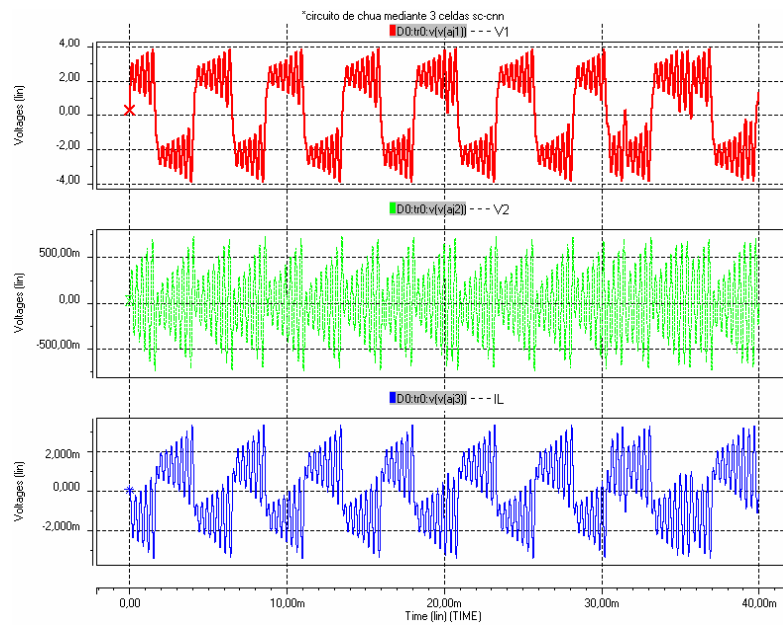


Figura 5.4 Respuesta Transiente en HSPICE de los Voltajes V1, V2 e IL en el Circuito de Chua

El atractor de doble scroll del circuito de Chua generado en HSPICE con las celdas SC-CNNs se bosqueja en la Fig. 5.5.

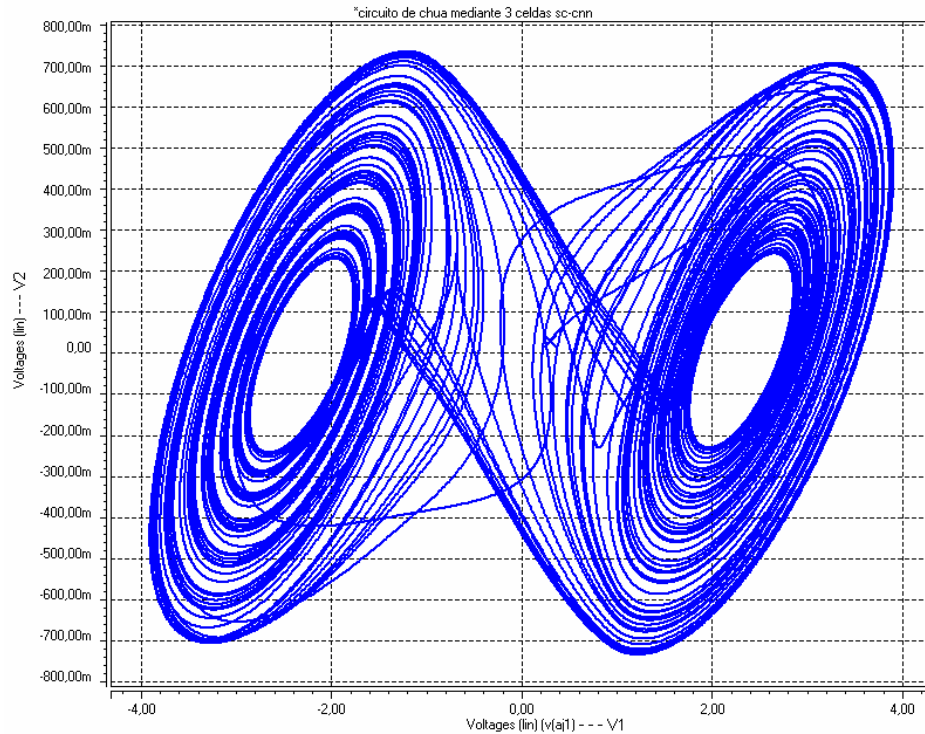


Figura 5.5 Atractor de Doble Scroll del Circuito de Chua en HSPICE

5.3 Análisis Transitorio del Circuito de Chua Adimensionado

El procedimiento a seguir es el mismo para todos los circuitos por ende se comienza presentando los valores en la tabla 5.2 de los elementos del circuito de Chua adimensionado que generan el comportamiento caótico.

Tabla 5.2 Valores de los Elementos del Circuito de Chua Adimensionado que Generan Caos

Elemento	Valor
R	$1.78k\Omega$
R_0	12.5Ω
C_1	$10nF$
C_2	$100nF$
L	$18mH$
E	$1V$
g_a	$-757e^{-6}$
g_b	$-409e^{-6}$
m_a	$1 + g_a R$
m_b	$1 + g_b R$

En la Fig. 5.6 se presenta el análisis transitorio de las variables adimensionadas x , y y z con los elementos del circuito de Chua adimensionado que generan caos.

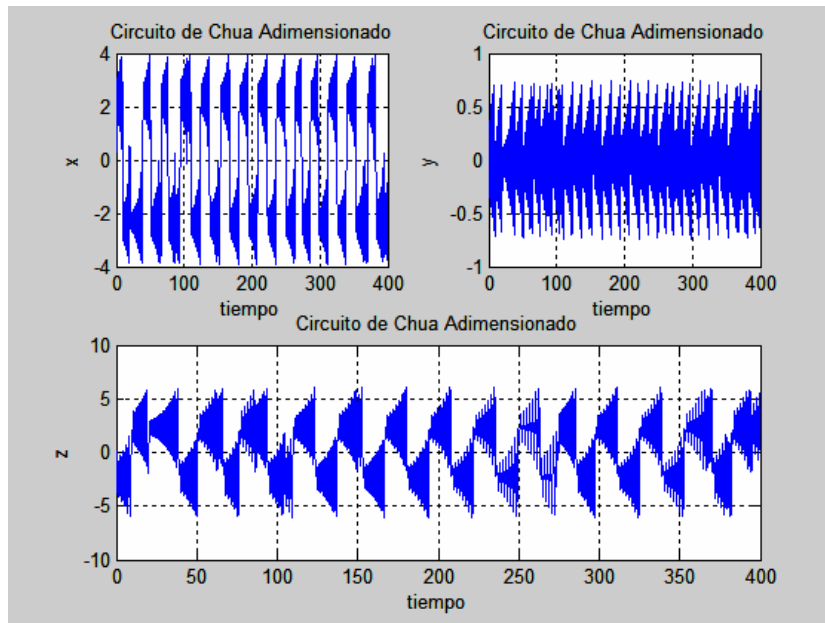


Figura 5.6 Respuesta Transitoria de los Variables x , y , z del Circuito de Chua Adimensionado

Ahora el atractor de doble scroll del circuito de Chua adimensionado en el espacio de fase $(y-x)$, se bosqueja en la Fig. 5.7.

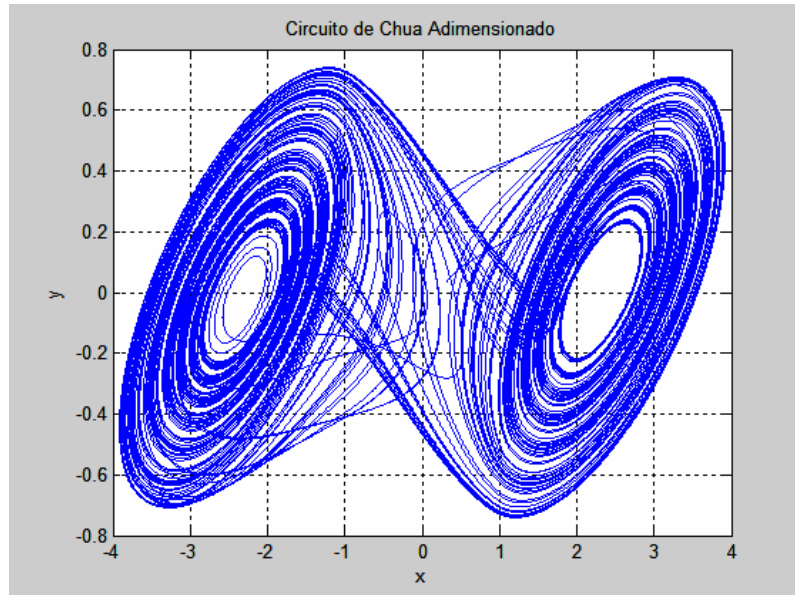


Figura 5.7 Atractor de Doble Scroll del Circuito de Chua Adimensionado en el Espacio de Fase $y-x$

La Fig. 5.8 muestra el atractor de doble scroll del circuito de Chua adimensionado en tres dimensiones.

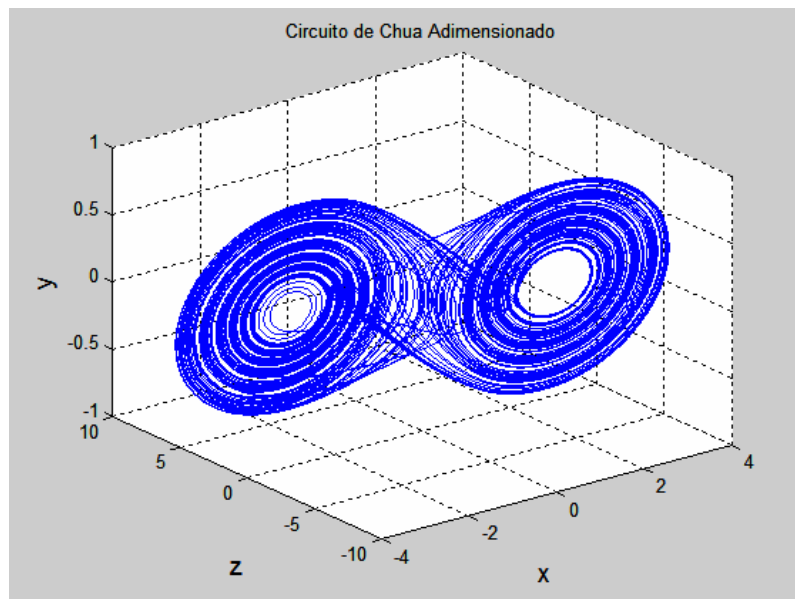


Figura 5.8 Atractor de Doble Scroll del Circuito de Chua Adimensionado

Al realizar el análisis transitorio en HSPICE Fig. 5.9 del Circuito de Chua adimensionado se obtiene.

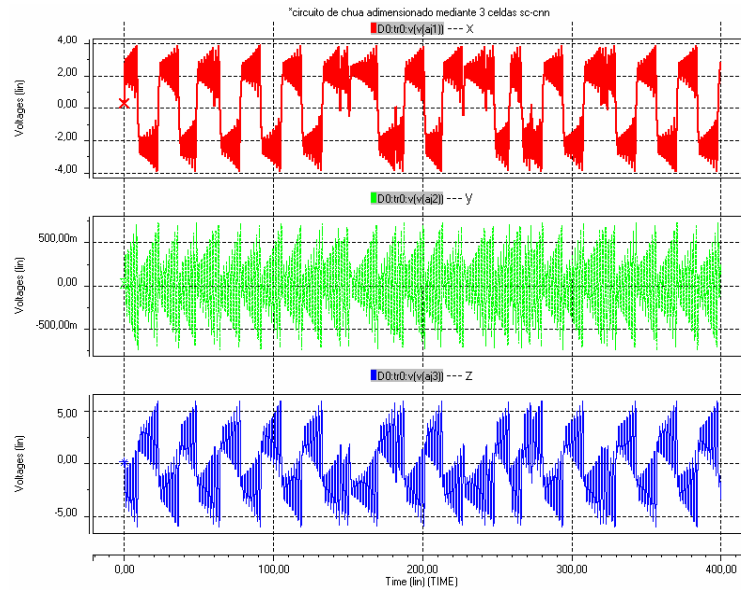


Figura 5.9 Respuesta Transiente en HSPICE de las Variables x, y, z en el Circuito de Chua Adimensionado

La simulación en HSPICE del atractor de doble scroll del circuito de Chua adimensionado con las celdas SC-CNNs se ilustra en la Fig. 5.10.

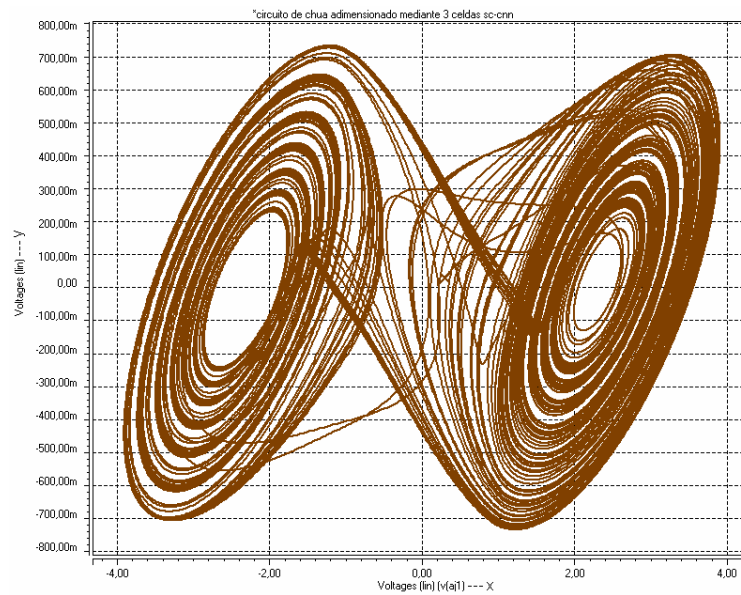


Figura 5.10 Atractor de Doble Scroll del Circuito de Chua Adimensionado en HSPICE

5.4 Análisis Transitorio del Circuito de Saito

Siguiendo la metodología del modelado primero se realiza la simulación en MATLAB de las ecuaciones de estado.

En la tabla 5.3 se presentan los valores de los elementos del circuito de Saito que generan el comportamiento caótico.

Tabla 5.3 Valores de los Elementos del Circuito de Saito que Generan Caos

Elemento	Valor
g	0.000195V
C_1	39nF
C_2	39nF
L	300mH
L_0	10mH
I	1
r_1	$10.4e^3$
r_2	$-10.4e^3$

Por otro lado, en la Fig. 5.11 se presenta el análisis transitorio de los voltajes de los capacitores V_1 , V_2 y las corrientes de inductores I_L e I_{L_0} , con los elementos del circuito de Saito que generan caos.

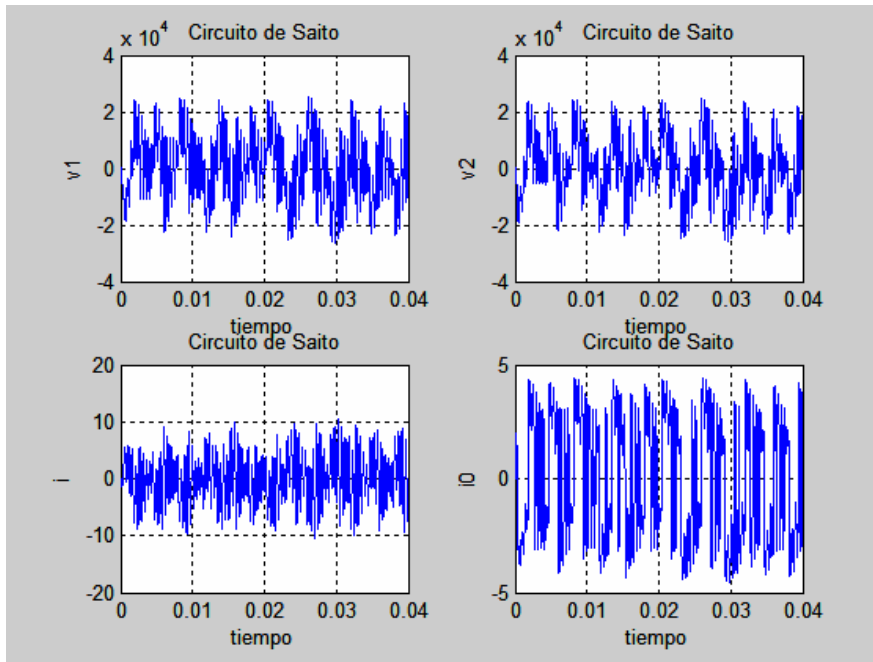


Figura 5.11 Respuesta Transitoria de los Voltajes V_1 , V_2 y corrientes i_L e i_{L0} del Circuito de Saito

La Fig. 5.12 muestra el comportamiento caótico del circuito de Saito en el espacio de fase ($V_1 - V_2$).

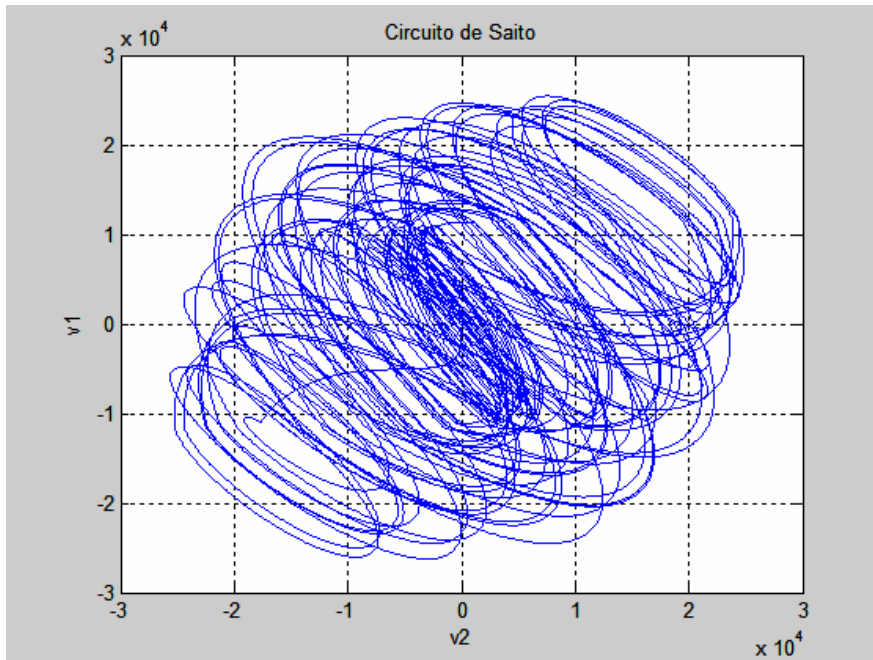


Figura 5.12 Comportamiento Caótico del Circuito de Saito en el Espacio de Fase V_1 - V_2

La respuesta en tres dimensiones del comportamiento caótico del Circuito de Saito se ilustra en la Fig. 5.13.

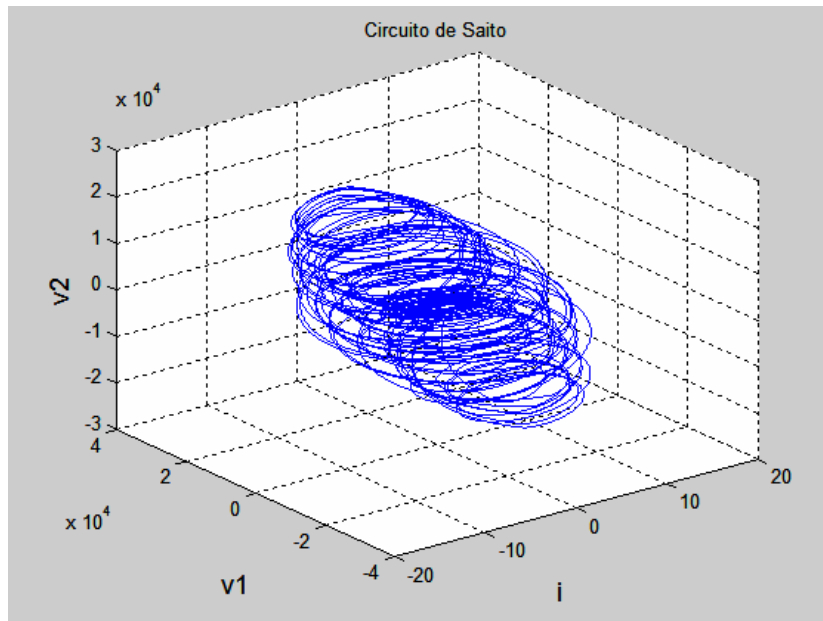


Figura 5.13 Comportamiento Caótico en el Circuito de Saito

Un fenómeno muy interesante que ocurre en el circuito de Saito, es que el elemento no lineal se comporta como un resistor con histéresis Fig. 5.14.

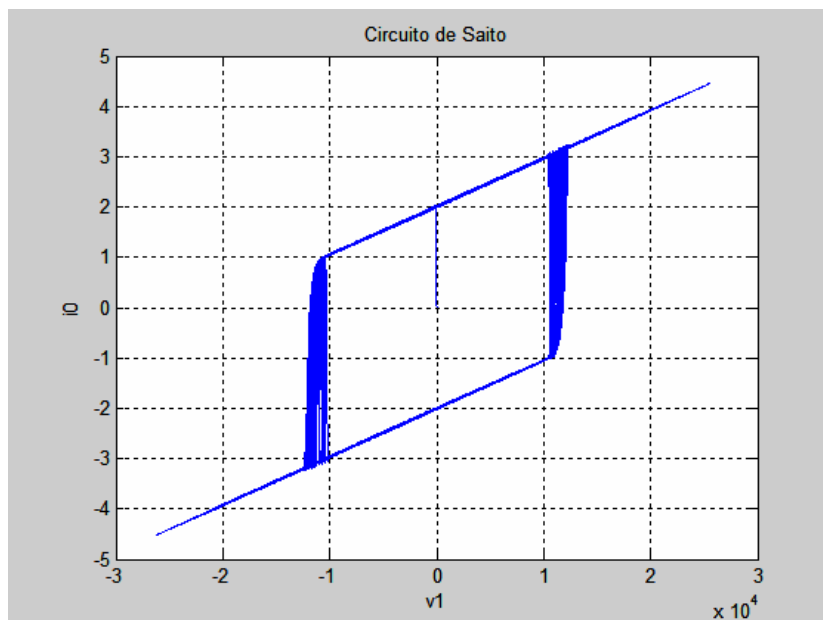


Figura 5.14 Comportamiento de Histéresis del Elemento no Lineal del Circuito de Saito

Cumpliendo con el paso de la simulación en HSPICE se realiza el análisis transiente de los voltajes V_1 , V_2 y las corrientes I_L e I_{L0} del Circuito de Saito Fig. 5.15.

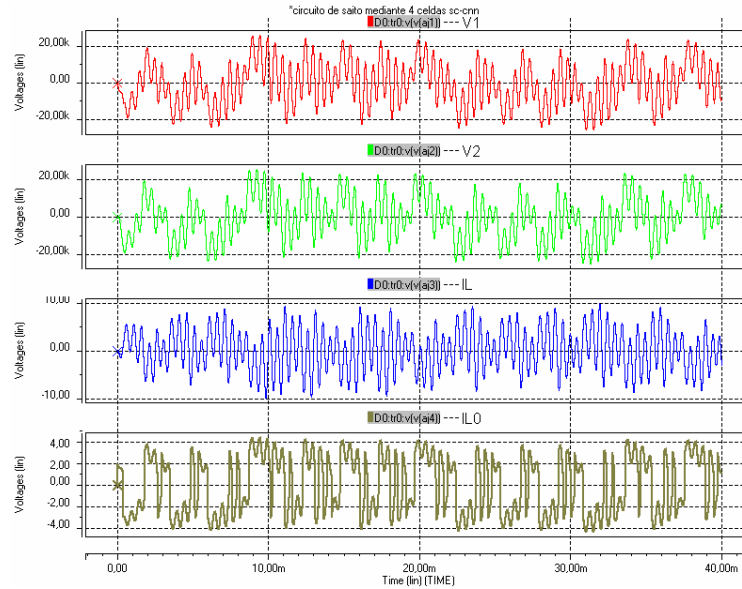


Figura 5.15 Respuesta Transiente en HSPICE de los Voltajes V_1 , V_2 y las corrientes I_L e I_{L0} en el Circuito de Saito

El comportamiento caótico del circuito de Saito generado en HSPICE mediante las celdas SC-CNNs se bosqueja en la Fig. 5.16.

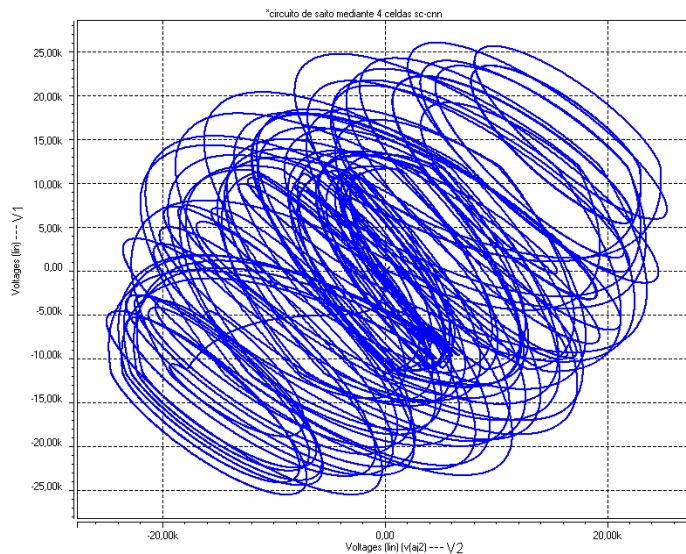


Figura 5.16 Comportamiento Caótico del Circuito de Saito en HSPICE

El comportamiento de histéresis del elemento no Lineal en HSPICE se muestra en la Fig. 5.17.

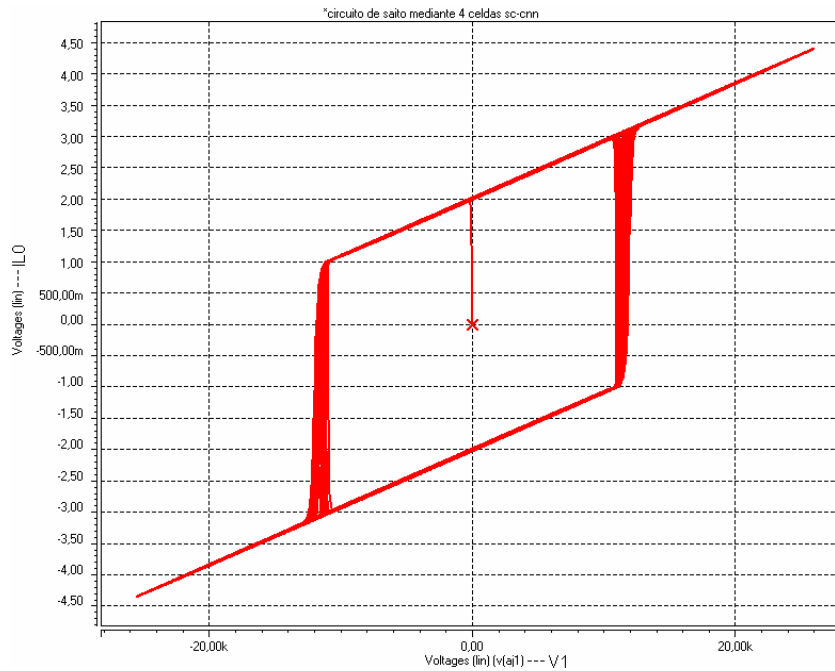


Figura 5.17 Comportamiento de Histéresis del Elemento no Lineal del Circuito de Saito en HSPICE

5.5 Análisis Transitorio del Circuito de Saito Adimensionado

Utilizando el mismo procedimiento que en los casos anteriores, se comienza presentando los valores de los elementos del circuito de Saito adimensionado que generan el comportamiento caótico en la tabla 5.4.

Tabla 5.4 Valores de los Elementos del Circuito de Saito Adimensionado que Generan Caos

Elemento	Valor
g	$0.000195\mathcal{U}$
C_1	$39nF$
C_2	$39nF$
L	$300mH$
L_0	$10mH$
I	1
r_1	$10.4e^3$
r_2	$-10.4e^3$
V	$-r_2 I$

En la Fig. 5.18 se presenta el análisis transitorio de las variables adimensionadas x , y , z y w , utilizando los elementos del circuito de Saito adimensionado que generan caos.

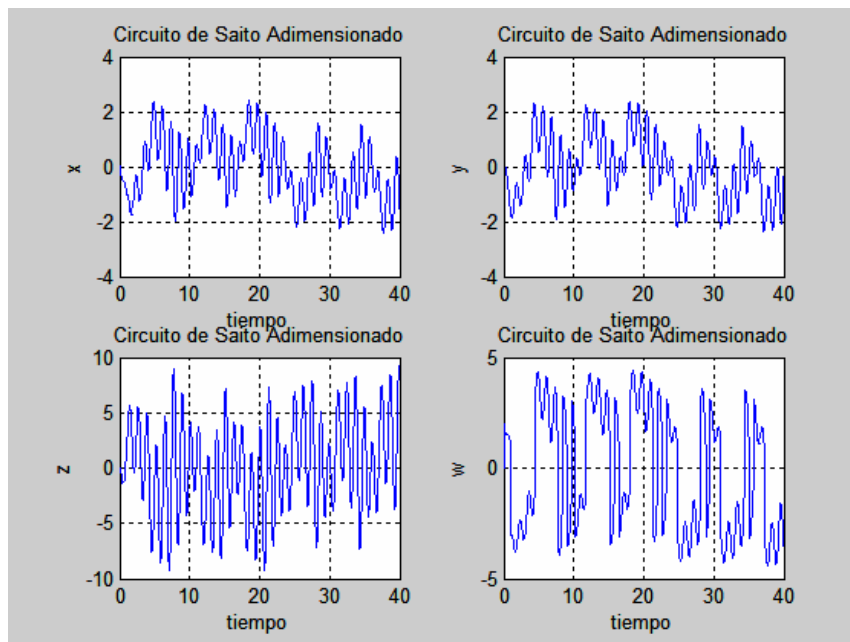


Figura 5.18 Respuesta Transitoria de los Variables x , y , z , w del Circuito de Saito Adimensionado

En la Fig. 5.19 se ilustra el comportamiento caótico del circuito de Saito adimensionado en el espacio de fase $(x - y)$.

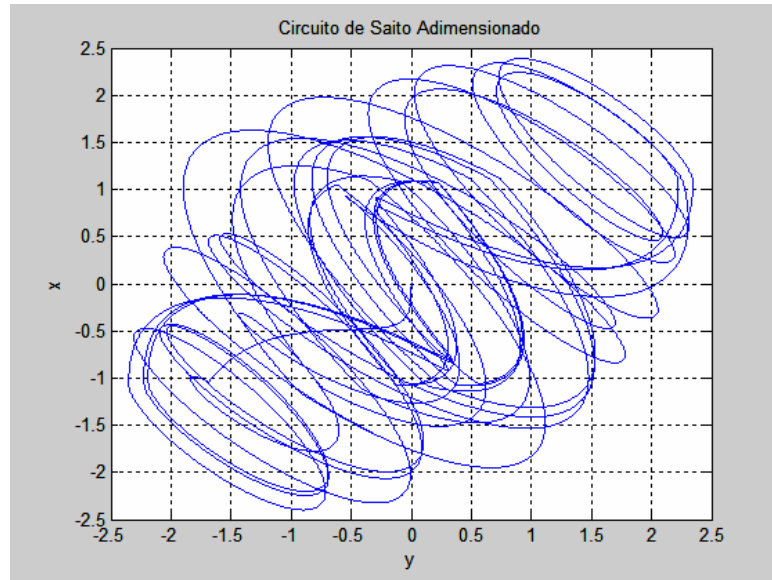


Figura 5.19 Comportamiento Caótico del Circuito de Saito Adimensionado en el Espacio de Fase $x-y$

El comportamiento caótico del circuito adimensionado de Saito en tres dimensiones se muestra en la Fig. 5.20.

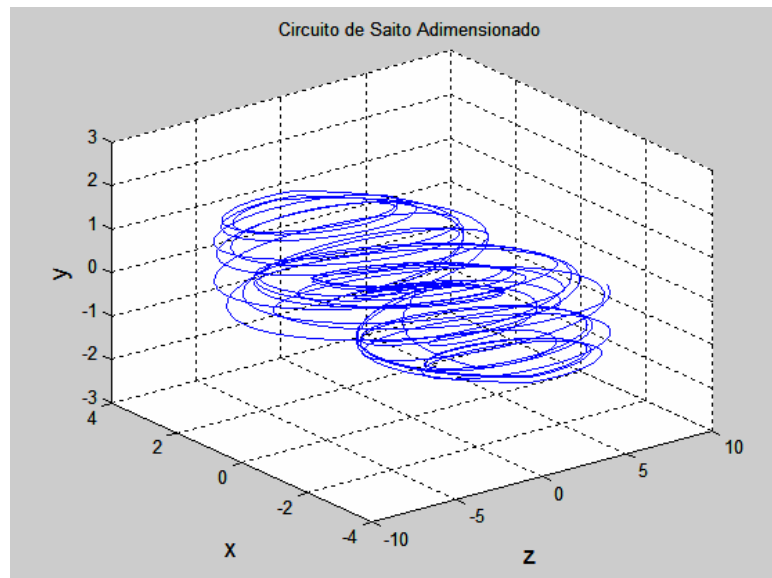


Figura 5.20 Comportamiento Caótico del Circuito de Saito Adimensionado

El fenómeno de histéresis del elemento no lineal obtenido para el circuito adimensionado de Saito se bosqueja en la Fig. 5.21.

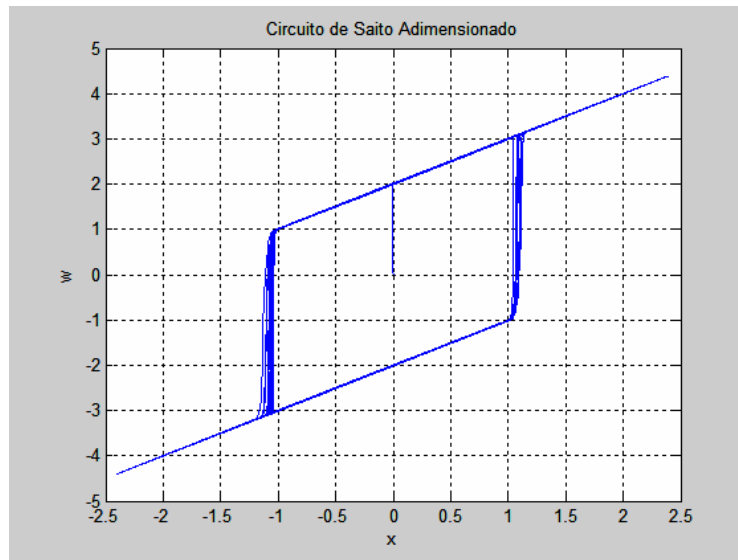


Figura 5.21 Comportamiento de Histéresis del Elemento no Lineal del Circuito Adimensionado de Saito

Realizando el análisis transitorio en HSPICE Fig. 5.22 del Circuito de Saito adimensionado se obtiene.

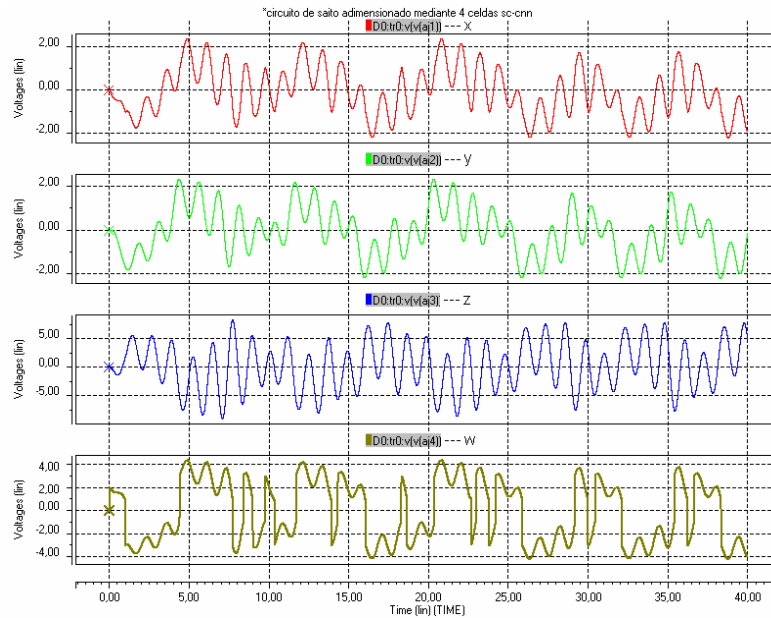


Figura 5.22 Respuesta Transiente en HSPICE de las Variables x, y, z, w en el Circuito de Saito Adimensionado

El resultado de la simulación en HSPICE del comportamiento caótico del circuito de Saito adimensionado con las celdas SC-CNNs se ilustra en la Fig. 5.23.

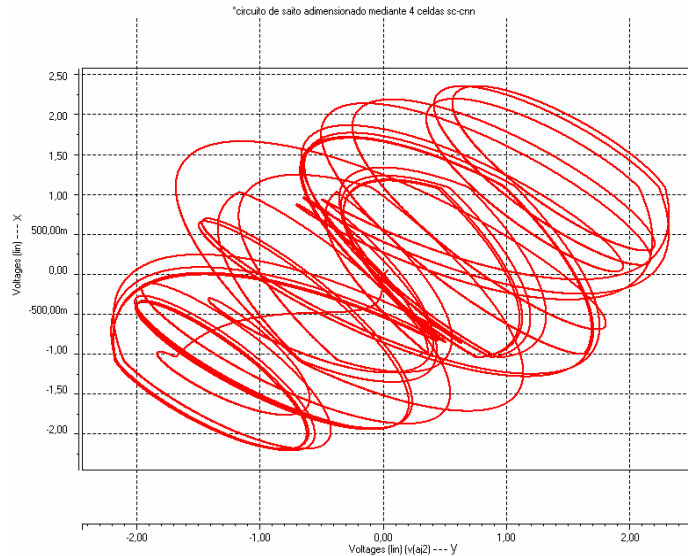


Figura 5.23 Comportamiento Caótico del Circuito de Saito Adimensionado en HSPICE

En la Fig. 5.24 se muestra el comportamiento de histéresis del elemento no Lineal en HSPICE del circuito de Saito adimensionado.

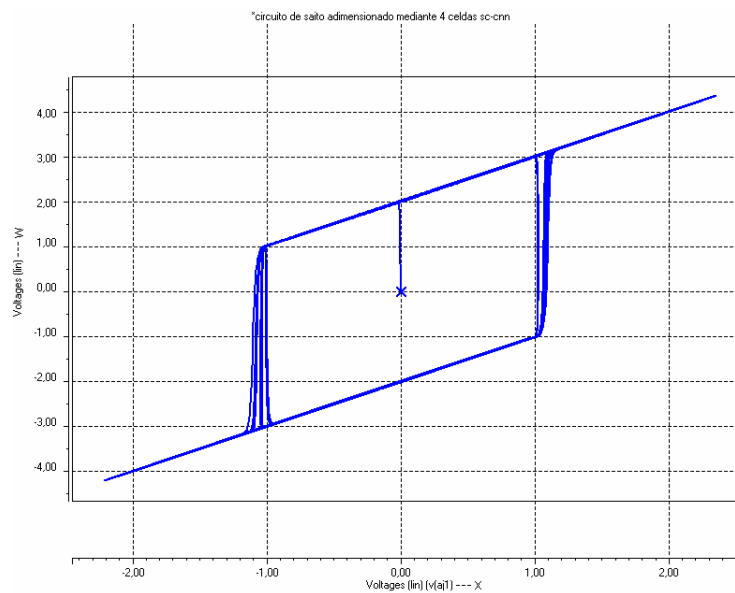


Figura 5.24 Comportamiento de Histéresis del Elemento no Lineal del Circuito de Saito Adimensionado en HSPICE

Capítulo 6

Conclusiones

6.1 Conclusiones

Debido al buen funcionamiento de la metodología para el modelado de una clase o grupo de sistemas caóticos de la forma $\dot{x}_i = -x_i + \sum_k (A_{ik} y_k + C_{ik} x_k) + i_i$, se puede utilizar para modelar cualquier sistema caótico o no caótico de la forma ya mencionada y así obtener los parámetros adecuados de las SC-CNNs que caracterizan al sistema original antes de llevar a cabo su implementación.

Aunque los resultados de las simulaciones no son exactamente iguales debido a la diferencia de los métodos de iteración de cada simulador, y debido a que se trata de sistemas caóticos, los resultados son bastante aproximados y con mínimas diferencias, lo cual indica que el modelado comportamental de los sistemas caóticos mediante SC-CNNs es correcto.

A partir del modelo generalizado de la SC-CNN, se estableció el modelo y las características del modelo utilizado para representar a los sistemas de la forma $\dot{x}_i = -x_i + \sum_k (A_{ik} y_k + C_{ik} x_k) + i_i$.

Se estableció la metodología que se debe de seguir para modelar cualquier sistema de la forma ya mencionada, sea caótico o no caótico.

Comprobamos que la metodología es útil tanto para sistemas dimensionados como para sistemas adimensionados, y que solo es necesario tener bien caracterizados a los sistemas.

Se desarrolló un subcircuito mediante el modelo ideal de la SC-CNN que representa a una celda SC-CNN. Esta celda es nuestro bloque básico de construcción y simulación de los sistemas de la forma ya mencionada.

Por medio de los resultados de las simulaciones se pudo comprobar que los circuitos caóticos de Chua y Saito modelados mediante celdas SC-CNN en HSPICE, tienen un comportamiento muy similar a las ecuaciones de estado de los circuitos simuladas en MATLAB, lo que corrobora el buen funcionamiento de la metodología de modelado.

6.2 Trabajo Futuro

Generalizar la metodología del modelado comportamental mediante SC-CNNs, de tal manera que incluya a los sistemas de la forma

$$\dot{x}_i = -x_i + \sum_k (A_{ik} y_k + B_{ik} u_k + C_{ik} x_k) + i_i .$$

Crear un programa amigable con ambiente de ventanas donde se especifiquen los parámetros del sistema y se genere automáticamente la respuesta del sistema en HSPICE.

Apéndice A

Modelo en HSPICE de la SC-CNN

A.1 Subcircuito que Modela la SC-CNN

Utilizando el modelo de la SC-CNN de la Fig. 4.2, se generó el subcircuito que modela a la SC-CNN en función de un una fuente de corriente independiente I_i , un capacitor lineal C_i , dos resistores lineales R_{xi} y R_{yi} , $2m$ fuentes de corriente controladas por voltaje ($2m$ fuentes, dado que $B_{i,k} = 0$) y una fuente de corriente lineal a trozos $I_{yx} = (1/R_{yi})f(V_{xi})$.

A.1.1 Subcircuito para una Celda SC-CNN

El caso del subcircuito de una sola celda SC-CNN esta compuesta de los elementos antes mencionados, pero con solo dos fuentes de corriente controladas por voltaje.

***Modelo para una sola celda SC-CNN**

.SUBCKT SC-CNN xiL yiL <parnam=val>

*Fuente Cte.

Ix 0 xiL li

*Elementos

Cx xiL 0 Ci

Rx xiL 0 Rxi

Ry yiL 0 Ryi

*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de cada celda

GxiL 0 xiL xiL 0 GxL

GyiL 0 xiL yiL 0 GyL

*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje

Gyxi 0 yiL CUR='(1/(2*Ryi))*(abs(v(xiL)+1)-abs(v(xiL)-1))'

.ENDS

A.1.2 Subcircuito para m-Celdas SC-CNN

Para el caso del subcircuito con m -celdas SC-CNN en lugar de tener solo 2, tiene $2m$ fuentes de corriente controladas por voltaje.

***Modelo para m-celdas SC-CNN**

.SUBCKT SC-CNN xiL xi1...xin yiL yi1...yin <parnam=val>

*Fuente Cte.

Ix 0 xiL Ii

*Elementos

Cx xiL 0 Ci

Rx xiL 0 Rxi

Ry yiL 0 Ryi

*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de cada celda

GxiL 0 xiL xiL 0 GxL

GyiL 0 xiL yiL 0 GyL

Gxi1 0 xiL xi1 0 Gxv1

Gyi1 0 xiL yi1 0 Gyv1

Gxin 0 xiL xin 0 Gxvn

Gyin 0 xiL yin 0 Gyvn

*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje

Gyxi 0 yiL CUR='(1/(2*Ryi))*(abs(v(xiL)+1)-abs(v(xiL)-1))'

.ENDS

A.2 Sintaxis del Subcircuito de una SC-CNN

Considerando m -celdas interactuando localmente, entonces la sintaxis del subcircuito de una de esas celdas esta dada por:

.SUBCKT subnam xiL xi1...xin yiL yi1...yin <parnam=val>

donde $n = m - 1$ y m es el numero de celdas (cada celda representa un estado).

Subnam: Especifica el nombre de referencia para el modelo de subcircuito.

Nodos xiL, yiL: Describen los nodos locales de la celda para referencia externa, el nodo xiL es el nodo local de estado de la celda, y el nodo yiL es el nodo local de salida de la celda. Para cada celda es necesario especificar el estado y la salida local, es decir si se trata de la primera celda el estado es $x1L$ y la salida es $y1L$, si se trata de la segunda celda el estado es $x2L$ y la salida es $y2L$ y así sucesivamente.

Nodos xin, yin: Son los nodos para referencia externa con las celdas vecinas. Los nodos xin , indican la dependencia con los estados de las celdas vecinas, mientras que los nodos yin indican la dependencia con las salidas de las celdas vecinas. En este caso n indica si depende del estado de la primera, segunda o n -ésima celda vecina e i indica la celda local.

Parnam: Es un conjunto de nombres de parámetros que solo son usados en el subcircuito y a los cuales hay que asignarles un valor. También se pueden asignar los valores de estos parámetros por medio de la instrucción que manda a llamar al subcircuito y por medio de un conjunto de valores declarados mediante la instrucción .PARAM.

A continuación se explica un ejemplo, para entender mejor el funcionamiento del subcircuito. Se empieza por suponer tres celdas interactuando localmente, en donde por cada celda tenemos dos nodos, por tanto, cada celda tiene 6 nodos.

Ejemplo:

XSC-CNN1 x1L x11 x12 y1L y11 y12 SC-CNN li=val Ci=val Rxi=val Ryi=val Ci1=val Ai1=val Ci2=val Ai2=val Ci3=val Ai3=val

XSC-CNN2 x2L x21 x22 y2L y21 y22 SC-CNN li=val Ci=val Rxi=val Ryi=val Ci1=val Ai1=val Ci2=val Ai2=val Ci3=val Ai3=val

XSC-CNN3 x3L x31 x32 y3L y31 y32 SC-CNN li=val Ci=val Rxi=val Ryi=val Ci1=val Ai1=val Ci2=val Ai2=val Ci3=val Ai3=val

El ejemplo anterior muestra las instrucciones que mandan a llamar al subcircuito, y donde se puede apreciar como están interconectadas las celdas. En el caso de la celda XSC-CNN1, el primer nodo es el estado local de la celda (XSC-CNN1), el segundo nodo es para la dependencia del estado con la primera celda vecina (celda XSC-CNN2), y el tercer nodo es para la dependencia con la segunda celda vecina (XSC-CNN3). Se aplica el mismo procedimiento para la dependencia con las salidas de las celdas.

En el caso de la celda XSC-CNN2, el primer nodo es el estado local de la celda (ahora el estado local de la celda es XSC-CNN2), el segundo nodo es para la dependencia del estado con la primera celda vecina (celda XSC-CNN1), y el tercer nodo es para la dependencia con la segunda celda vecina (XSC-CNN3). De la misma manera se aplica el mismo procedimiento para la dependencia con las salidas de las celdas.

Siguiendo el mismo procedimiento se obtiene la asignación de los nodos para la tercera celda.

Como una ultima observación es necesario establecer todos los parámetros, ya sea mediante la instrucción del subcircuito, la instrucción que manda a llamar al subcircuito o la instrucción .PARAM.

Apéndice B

Programas en MATLAB

B.1 Listados de Programas

En este apéndice se muestran los listados en MATLAB que se utilizaron para la elaboración de la tesis.

B.1.1 Listado del Circuito de Chua

```
%Circuito de Chua Usando la Ecuación General
clc;
close all;
clear;
format long;

%Valores de los Elementos del Circuito
R=1780;
R0=12.5;
C1=10E-9;
C2=100E-9;
L=18e-3;
h=1e-7;

%Condiciones Iniciales
v1=0.3; v2=0.03; i=0.0001;

%Valores de la Característica del Diodo de Chua
E=1; ga=-757e-6; gb=-409e-6;

p=input(' Número de puntos ');
```

```
t=0:h:p*h-h;

%Iteración de las Ecuaciones
for f=1:p
    vc1=v1;
    vc2=v2;
    il=i;

    RN=((gb*vc1)+0.5*((ga-gb)*(abs(vc1+E)-abs(vc1-E))));

    A=(vc2-vc1)/(R*C1)-RN/C1;
    B=(vc1-vc2)/(R*C2)+il/C2;
    C=-vc2/L-(il*R0)/L;

    vc1f(f)=v1+h*A;
    vc2f(f)=v2+h*B;
    ilf(f)=il+h*C;

    v1=vc1f(f);
    v2=vc2f(f);
    i=ilf(f);
end
```

B.1.2 Listado del Circuito de Chua Adimensionado

```
%Circuito de Chua Adimensionado Usando la Ecuación General
clc;
close all;
clear;

%Valores de los Elementos del Circuito
R=1780;
R0=12.5;
C1=10e-9;
C2=100e-9;
L=18e-3;
h=1e-3;

%Condiciones Iniciales
v1 = 0.3;
v2 = 0.03;
i = 0.0001;

%Valores de la Característica del Diodo de Chua
ga = -757e-6;
gb = -409e-6;
ma = 1+ga*R;
mb = 1+gb*R;
E = 1;
```

```

p=input(' Número de puntos ');
t=0:h:p*h-h;

%Variables Adimensionadas y Parámetros de las Ecuaciones
x=v1/E;
y=v2/E;
z=(i*R)/E;
Ka=C2/C1;
Kb=(C2*R*R)/L;
Kc=(C2*R*R0)/L;

%Iteración de las Ecuaciones
for f=1:p
    fx=((mb*x)+0.5*((ma-mb)*(abs(x+E)-abs(x-E))));

    A=Ka*(y-fx);
    B=x-y+z;
    C=-Kb*y-Kc*z;

    vc1f(f)=x+h*A;
    vc2f(f)=y+h*B;
    ilf(f)=z+h*C;

    x=vc1f(f);
    y=vc2f(f);
    z=ilf(f);
end

```

B.1.3 Listado del Circuito de Saito

```

%Circuito de Saito Dimensionado Usando la Ecuación General
clc;
close all;
clear;
format long;

%Valores de los Elementos del Circuito
g=0.000195;
C1=39E-9;
C2=39E-9;
L=300e-3;
L0=10e-3;
h=1e-6;

%Condiciones Iniciales
v1=0.3; v2=0.03; i=0.0001; i0=0.0001;

%Valores de la Característica del Elemento no Lineal
l=1; r2=-10.4e3; r1=10.4e3;

```

```
p=input(' Número de puntos ');
t=0:h:p*h-h;

%Iteración de las Ecuaciones
for f=1:p
    vc1=v1;
    vc2=v2;
    il=i;
    i0=i0;

    RN=((r1*i0)+0.5*(r2-r1)*(abs(i0+l)-abs(i0-l)));

    A=-il/C1-il0/C1;
    B=(g*vc2)/C2+il/C2;
    C=vc1/L-vc2/L;
    D=vc1/L0-RN/L0;

    vc1f(f)=v1+h*A;
    vc2f(f)=v2+h*B;
    ilf(f)=i+h*C;
    i0f(f)=i0+h*D;

    v1=vc1f(f);
    v2=vc2f(f);
    i=ilf(f);
    i0=i0f(f);
end
figure(7);
plot(vc1f,ilf); grid;
title('Circuito de Saito');
ylabel('i');
xlabel('v1');
```

B.1.4 Listado del Circuito de Saito Adimensionado

```
%Circuito de Saito Adimensionado Usando la Ecuación General
clc;
close all;
clear;

%Valores de los Elementos del Circuito
g=0.000195;
C1=39E-9;
C2=39E-9;
L=300e-3;
L0=10e-3;
h=1e-3;

%Condiciones Iniciales
v1=0.3; v2=0.03; i=0.0001; i0=0.0001;
```

```
%Valores de la Característica del Elemento no Lineal
l=1; r2=-10.4e3; r1=10.4e3;

p=input(' Número de puntos ');
t=0:h:p*h-h;

%Variables Adimensionadas y Parámetros de las Ecuaciones
V=-r2*I;
x=v1/V;
y=v2/V;
z=(i*r1)/V;
w=(i0*r1)/V;
Ka=r1*g;
Kb=C1/C2;
Kc=(C1*r1*r1)/L;
Kd=L0/(C1*r1*r1);
Ke=r1/r2;

%Iteración de las Ecuaciones
for f=1:p
    fw=(w+(0.5/r1)*((r2-r1)*(abs(w-Ke)-abs(w+Ke))));

    A=-z-w;
    B=Kb*(Ka*y+z);
    C=Kc*(x-y);
    D=x/Kd-fw/Kd;

    vc1f(f)=x+h*A;
    vc2f(f)=y+h*B;
    ilf(f)=z+h*C;
    ilOf(f)=w+h*D;

    x=vc1f(f);
    y=vc2f(f);
    z=ilf(f);
    w=ilOf(f);
end
```


Apéndice C

Listados de HSPICE

C.1 Listados de los Circuitos Caóticos

A continuación se presentan los listados de HSPICE que se utilizaron para las simulaciones de los circuitos de Chua y Saito.

C.1.1 Circuito de Chua en HSPICE

*Circuito de Chua mediante 3 celdas SC-CNN

*SUBCIRCUITO

.SUBCKT SC-CNNa xjL xjv1 yjL

*Fuente Cte.

*Ix 0 xjL Ij

*Elementos

Cx xjL 0 Cj

Rx xjL 0 Rxj

Ryj yjL 0 Ryj

*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de cada celda

GxjL 0 xjL xjL 0 GxL

GyjL 0 xjL yjL 0 GyL

Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1

*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1

*Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2

*Gyjv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2

*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje

Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'

.ENDS

.SUBCKT SC-CNNb xjL xjv1 xjv2

Apéndice C

```
*Fuente Cte.
*Ix 0 xjL Ij
*Elementos
Cx xjL 0 Cj
Rx xjL 0 Rxj
*Ry yjL 0 Ryj
*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de
cada celda
*GxjL 0 xjL xjL 0 GxL
*GyjL 0 xjL yjL 0 GyL
Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1
*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1
Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2
*Gyjv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2
*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje
*Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'
.ENDS

.SUBCKT SC-CNNc xjL xjv2
*Fuente Cte.
*Ix 0 xjL Ij
*Elementos
Cx xjL 0 Cj
Rx xjL 0 Rxj
*Ry yjL 0 Ryj
*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de
cada celda
*GxjL 0 xjL xjL 0 GxL
*GyjL 0 xjL yjL 0 GyL
*Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1
*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1
Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2
*Gyjv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2
*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje
*Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'
.ENDS

XSC-CNNa1 aj1 aj2 bj1 SC-CNNa Cj=10n Rxj=1780 Ryj=1k GxL=0.000409 GyL=0.000348
Gxv1=0.0005618
XSC-CNNb1 aj2 aj1 aj3 SC-CNNb Cj=100n Rxj=1780 Gxv1=0.0005618 Gxv2=1
XSC-CNNc1 aj3 aj2 SC-CNNc Cj=0.809u Rxj=1780 Gxv2=-0.00004494

*Comandos de Simulación
.op
.option node post
*.options nopage numdgt=4
.IC V(aj1)=0.3
.IC V(aj2)=0.03
.IC V(aj3)=0.0001
.tran 1e-7 4e-2
.print tran v(aj1) v(aj2) v(aj3) v(bj1)
.end
```

C.1.2 Circuito de Chua Adimensionado en HSPICE

*Circuito de Chua Adimensionado mediante 3 celdas SC-CNN

*SUBCIRCUITO

.SUBCKT SC-CNNa xjL xjv1 yjL

*Fuente Cte.

*Ix 0 xjL Ij

*Elementos

Cx xjL 0 Cj

*Rx xjL 0 Rxj

Ry yjL 0 Ryj

*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de cada celda

GxjL 0 xjL xjL 0 GxL

GyjL 0 xjL yjL 0 GyL

Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1

*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1

*Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2

*Gyjv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2

*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje

Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'

.ENDS

.SUBCKT SC-CNNb xjL xjv1 xjv2

*Fuente Cte.

*Ix 0 xjL Ij

*Elementos

Cx xjL 0 Cj

*Rx xjL 0 Rxj

*Ry yjL 0 Ryj

*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de cada celda

GxjL 0 xjL xjL 0 GxL

*GyjL 0 xjL yjL 0 GyL

Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1

*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1

Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2

*Gyjv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2

*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje

*Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'

.ENDS

.SUBCKT SC-CNNc xjL xjv2

*Fuente Cte.

*Ix 0 xjL Ij

*Elementos

Cx xjL 0 Cj

Rx xjL 0 Rxj

*Ry yjL 0 Ryj

*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de cada celda

```
*GxjL 0 xjL xjL 0 GxL
*GyjL 0 xjL yjL 0 GyL
*Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1
*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1
Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2
*Gyjv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2
*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje
*Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'
.ENDS

XSC-CNNa1 aj1 aj2 bj1 SC-CNNa Cj=10n Ryj=1k GxL=-0.0000000272 GyL=0.00000006194
Gxv1=0.0000001
XSC-CNNb1 aj2 aj1 aj3 SC-CNNb Cj=100n GxL=-0.0000001 Gxv1=0.0000001
Gxv2=0.0000001
XSC-CNNc1 aj3 aj2 SC-CNNc Cj=0.004545 Rxj=1780 Gxv2=-0.08

*Comandos de Simulación
.op
.option node post
*.options nopage numdgt=4
.IC V(aj1)=0.3
.IC V(aj2)=0.03
.IC V(aj3)=0.178
.tran 1e-3 4e2
.print tran v(aj1) v(aj2) v(aj3) v(bj1)
.end
```

C.1.3 Circuito de Saito en HSPICE

```
*Circuito de Saito mediante 4 celdas SC-CNN

*SUBCIRCUITOS
.SUBCKT SC-CNNa xjL xjv2 xjv3 Cj=39n Gxv2=-1 Gxv3=-1
*Fuente Cte.
*Ix 0 xjL Ij
*Elementos
Cx xjL 0 Cj
*Rx xjL 0 Rxj
*Ry yjL 0 Ryj
*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de
cada celda
*GxjL 0 xjL xjL 0 GxL
*GyjL 0 xjL yjL 0 GyL
*Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1
*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1
Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2
*Gyjv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2
Gxjv3 0 xjL xjv3 0 Gxv3
*Gyjv3 0 xjL yjv3 0 Gyv3
*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje
```

```

*Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'
.ENDS

.SUBCKT SC-CNNb xjL xjv2 Cj=39n GxL=0.000195 Gxv2=1
*Fuente Cte.
*Ix 0 xjL Ij
*Elementos
Cx xjL 0 Cj
*Rx xjL 0 Rxj
*Ry yjL 0 Ryj
*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de
cada celda
GxjL 0 xjL xjL 0 GxL
*GyjL 0 xjL yjL 0 GyL
*Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1
*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1
Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2
*Gyjv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2
*Gxjv3 0 xjL xjv3 0 Gxv3
*Gyjv3 0 xjL yjv3 0 Gyv3
*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje
*Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'
.ENDS

.SUBCKT SC-CNNc xjL xjv1 xjv2 Cj=10u Gxv1=0.00003333 Gxv2=-0.00003333
*Fuente Cte.
*Ix 0 xjL Ij
*Elementos
Cx xjL 0 Cj
*Rx xjL 0 Rxj
*Ry yjL 0 Ryj
*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de
cada celda
*GxjL 0 xjL xjL 0 GxL
*GyjL 0 xjL yjL 0 GyL
Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1
*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1
Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2
*Gyjv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2
*Gxjv3 0 xjL xjv3 0 Gxv3
*Gyjv3 0 xjL yjv3 0 Gyv3
*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje
*Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'
.ENDS

.SUBCKT SC-CNNd xjL xjv1 yjL Cj=0.1875n Rxj=5128 Ryj=1k GyL=0.00039
Gxv1=0.000000018
*Fuente Cte.
*Ix 0 xjL Ij
*Elementos
Cx xjL 0 Cj
Rx xjL 0 Rxj
Ry yjL 0 Ryj

```

*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de cada celda

*GxjL 0 xjL xjL 0 GxL

GyjL 0 xjL yjL 0 GyL

Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1

*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1

*Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2

*Gyjv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2

*Gxjv3 0 xjL xjv3 0 Gxv3

*Gyjv3 0 xjL yjv3 0 Gyv3

*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje

Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ry))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'

.ENDS

XSC-CNNa1 aj1 aj3 aj4 SC-CNNa

XSC-CNNb1 aj2 aj3 SC-CNNb

XSC-CNNc1 aj3 aj1 aj2 SC-CNNc

XSC-CNNd1 aj4 aj1 bj4 SC-CNNd

*Comandos de Simulación

.op

.option node post

*.options nopage numdgt=4

.IC V(aj1)=0.3

.IC V(aj2)=0.03

.IC V(aj3)=0.0001

.IC V(aj4)=0.0001

.tran 1e-7 4e-2

.print tran v(aj1) v(aj2) v(aj3) v(aj4)

.end

C.1.4 Circuito de Saito Adimensionado en HSPICE

*Circuito de Saito Adimensionado mediante 4 celdas SC-CNN

*SUBCIRCUITOS

.SUBCKT SC-CNNa xjL xjv2 xjv3 Cj=39n Gxv2=-0.000000039 Gxv3=-0.000000039

*Fuente Cte.

*Ix 0 xjL Ij

*Elementos

Cx xjL 0 Cj

*Rx xjL 0 Rxj

*Ry yjL 0 Ryj

*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de cada celda

*GxjL 0 xjL xjL 0 GxL

*GyjL 0 xjL yjL 0 GyL

*Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1

*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1

Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2

```
*Gyiv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2
Gxjv3 0 xjL xjv3 0 Gxv3
*Gyiv3 0 xjL yjv3 0 Gyv3
*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje
*Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'
.ENDS
```

```
.SUBCKT SC-CNNb xjL xjv2 Cj=39n GxL=0.00000007909 Gxv2=0.000000039
*Fuente Cte.
*Ix 0 xjL Ij
*Elementos
Cx xjL 0 Cj
*Rx xjL 0 Rxj
*Ry yjL 0 Ryj
*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de
cada celda
GxjL 0 xjL xjL 0 GxL
*GyjL 0 xjL yjL 0 GyL
*Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1
*Gyiv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1
Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2
*Gyiv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2
*Gxjv3 0 xjL xjv3 0 Gxv3
*Gyiv3 0 xjL yjv3 0 Gyv3
*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje
*Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'
.ENDS
```

```
.SUBCKT SC-CNNc xjL xjv1 xjv2 Cj=10u Gxv1=0.0001406 Gxv2=-0.0001406
*Fuente Cte.
*Ix 0 xjL Ij
*Elementos
Cx xjL 0 Cj
*Rx xjL 0 Rxj
*Ry yjL 0 Ryj
*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de
cada celda
*GxjL 0 xjL xjL 0 GxL
*GyjL 0 xjL yjL 0 GyL
Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1
*Gyiv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1
Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2
*Gyiv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2
*Gxjv3 0 xjL xjv3 0 Gxv3
*Gyiv3 0 xjL yjv3 0 Gyv3
*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje
*Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'
.ENDS
```

```
.SUBCKT SC-CNNd xjL xjv1 yjL Cj=0.4623u Rxj=5128 Ryj=1k GyL=0.00039 Gxv1=0.000195
*Fuente Cte.
*Ix 0 xjL Ij
*Elementos
Cx xjL 0 Cj
```

```
Rx xjL 0 Rxj
Ry yjL 0 Ryj
*Fuentes de corriente lineales controladas por voltaje debidas a los estados y salidas de
cada celda
*GxjL 0 xjL xjL 0 GxL
GyjL 0 xjL yjL 0 GyL
Gxjv1 0 xjL xjv1 0 Gxv1
*Gyjv1 0 xjL yjv1 0 Gyv1
*Gxjv2 0 xjL xjv2 0 Gxv2
*Gyjv2 0 xjL yjv2 0 Gyv2
*Gxjv3 0 xjL xjv3 0 Gxv3
*Gyjv3 0 xjL yjv3 0 Gyv3
*Fuente de corriente lineal a tramos controlada por voltaje
Gyxj 0 yjL CUR='(1/(2*Ryj))*(abs(v(xjL)+1)-abs(v(xjL)-1))'
.ENDS

XSC-CNNa1 aj1 aj3 aj4 SC-CNNa
XSC-CNNb1 aj2 aj3 SC-CNNb
XSC-CNNc1 aj3 aj1 aj2 SC-CNNc
XSC-CNNd1 aj4 aj1 bj4 SC-CNNd

*Comandos de Simulación
.op
.option node post
*.options nopage numdgt=4
.IC V(aj1)=0.00002885
.IC V(aj2)=0.000002885
.IC V(aj3)=0.0001
.IC V(aj4)=0.0001
.tran 1e-4 4e1
.print tran v(aj1) v(aj2) v(aj3) v(aj4)
.end
```


Índice de Figuras

Figura 2.1 Circuito de Chua.....	8
Figura 2.2 Relación Corriente Voltaje del Diodo de Chua.....	8
Figura 2.3 Circuito de Saito	12
Figura 2.4 Relación Voltaje Corriente del Resistor no Lineal de Saito.....	12
Figura 3.1 Arquitectura Estándar de una CNN.....	19
Figura 3.2 a) Vecindad de 3x3 (r=1), b) Vecindad de 5x5 (r=2)	20
Figura 3.3 Celdas Limite y Celdas Esquina	20
Figura 3.4 Circuito de la Celda de una CNN.....	21
Figura 3.5 Característica de la Fuente Controlada No Lineal.....	22
Figura 3.6 Circuito de la Celda de una SC-CNN.....	25
Figura 4.1 Modelo Generalizado de la Celda $C(i)$ de una SC-CNN	30
Figura 4.2 Modelo Generalizado de la Celda $C(i)$ de una SC-CNN con $B_{i,k} = 0$	31
Figura 4.3 Metodología del Modelado Comportamental Mediante SC-CNNs 32	
Figura 5.1 Respuesta Transitoria de los Voltajes V1, V2 e IL del Circuito de Chua	39
Figura 5.2 Atractor de Doble Scroll del Circuito de Chua en el Espacio de Fase V2-V1.....	39
Figura 5.3 Atractor de Doble Scroll en el Circuito de Chua.....	40
Figura 5.4 Respuesta Transiente en HSPICE de los Voltajes V1, V2 e IL en el Circuito de Chua	40
Figura 5.5 Atractor de Doble Scroll del Circuito de Chua en HSPICE	41
Figura 5.6 Respuesta Transitoria de los Variables x, y, z del Circuito de Chua Adimensionado	42
Figura 5.7 Atractor de Doble Scroll del Circuito de Chua Adimensionado en el Espacio de Fase y-x	43
Figura 5.8 Atractor de Doble Scroll del Circuito de Chua Adimensionado	43
Figura 5.9 Respuesta Transiente en HSPICE de las Variables x, y, z en el Circuito de Chua Adimensionado	44
Figura 5.10 Atractor de Doble Scroll del Circuito de Chua Adimensionado en HSPICE.....	44
Figura 5.11 Respuesta Transitoria de los Voltajes V1, V2 y corrientes IL e IL0 del Circuito de Saito.....	46
Figura 5.12 Comportamiento Caótico del Circuito de Saito en el Espacio de Fase V1-V2.....	46
Figura 5.13 Comportamiento Caótico en el Circuito de Saito.....	47

Figura 5.14 Comportamiento de Histéresis del Elemento no Lineal del Circuito de Saito	47
Figura 5.15 Respuesta Transiente en HSPICE de los Voltajes V1, V2 y las corrientes IL e IL0 en el Circuito de Saito	48
Figura 5.16 Comportamiento Caótico del Circuito de Saito en HSPICE.....	48
Figura 5.17 Comportamiento de Histéresis del Elemento no Lineal del Circuito de Saito en HSPICE	49
Figura 5.18 Respuesta Transitoria de los Variables x, y, z, w del Circuito de Saito Adimensionado	50
Figura 5.19 Comportamiento Caótico del Circuito de Saito Adimensionado en el Espacio de Fase x-y	51
Figura 5.20 Comportamiento Caótico del Circuito de Saito Adimensionado .	51
Figura 5.21 Comportamiento de Histéresis del Elemento no Lineal del Circuito Adimensionado de Saito.....	52
Figura 5.22 Respuesta Transiente en HSPICE de las Variables x, y, z, w en el Circuito de Saito Adimensionado	52
Figura 5.23 Comportamiento Caótico del Circuito de Saito Adimensionado en HSPICE	53
Figura 5.24 Comportamiento de Histéresis del Elemento no Lineal del Circuito de Saito Adimensionado en HSPICE	53

Índice de Tablas

Tabla 5.1 Valores de los Elementos del Circuito de Chua que Generan Caos	38
Tabla 5.2 Valores de los Elementos del Circuito de Chua Adimensionado que Generan Caos.....	42
Tabla 5.3 Valores de los Elementos del Circuito de Saito que Generan Caos	45
Tabla 5.4 Valores de los Elementos del Circuito de Saito Adimensionado que Generan Caos.....	50

Bibliografía

- [1] L. O. Chua, and L. Yang.
Cellular Neural Networks: Theory.
IEEE Trans. CAS, Vol. 35, No. 10, pp. 1257-1272, 1988.

- [2] L. O. Chua, and L. Yang.
Cellular Neural Networks: Applications.
IEEE Trans. CAS, Vol. 35, No. 10, pp. 1273-1290, 1988.

- [3] L. O. Chua, and T. Roska.
The CNN Paradigm.
IEEE Trans. CAS-I, Vol. 40, No. 3, pp. 147-156, 1993.

- [4] P. Arena, S. Baglio, L. Fortuna, and G. Manganaro.
SC-CNN Based Systems to Realize a Class of Autonomous and
Coupled Chaotic Circuits.
ISCAS 1997, Vol. 1, No., pp. 581-584, 1997.

- [5] L. Fortuna, A. Rizzo, and M. G. Xibilia.
Modeling Complex Dynamics via Extended PWL-Based CNNs.
Int. J. of Bifurcation and Chaos, Vol. 13, No. 11, pp. 3273-3286,
2003.

- [6] P. Arena, S. Baglio, L. Fortuna, and G. Manganaro.
Chua's Circuit Can Be Generated by CNN Cells.
IEEE Trans. CAS-I, Vol. 42, No. 2, pp. 123-125, 1995.

- [7] P. Arena, S. Baglio, L. Fortuna, and G. Manganaro.
Simplified Scheme for Realization of Chua Oscillator by using SC-
CNN Cells.

Electronics Letters, Vol. 31, No. 21, pp. 1794-1795, 1995.

- [8] Prem Bhushan Mital, Umesh Kumar, and Rai Sachindra Prasad.
Chua's Circuit – A Universal Paradigm for Generating and Studying
Chaos.
J. of Active and Passive Elect. Dev., Vol. 3, No. 1, pp. 51-63, 2008.
- [9] R. Tetzlaff.
Proceedings of the 7th IEEE International Workshop on Cellular
Neural Networks and their Applications.
World Scientific, pp. 55-62, 2002.
- [10] T. Saito.
An Approach Toward Higher Dimensional Hysteresis Chaos
Generators.
IEEE Trans. CAS, Vol. 37, No. 3, pp. 399-409, 1990.
- [11] P. Arena, S. Baglio, L. Fortuna, and G. Manganaro.
How State Controlled CNN Cells Generate the Dynamics of the
Colpitts-Like Oscillator.
IEEE Trans. CAS-I, Vol. 43, No. 7, pp. 602-605, 1996.
- [12] P. Arena, S. Baglio, L. Fortuna, and G. Manganaro.
Generation of n-double Scrolls via Cellular Neural Networks.
Int. J. of Circuit Theory and Applications, Vol. 24, No. 3, pp. 241-
252, 1996.
- [13] E. Gunay, and M. Alci
n-double Scrolls in SC-CNN Circuit via Diode-Based PWL Function.
Int. J. of Bifurcation and Chaos, Vol. 16, No. 4, pp. 1023-1033,
2006.

- [14] E. Gunay, E. Uzunhisarcikli, R. Kilic, and M. Alci.
A Realization of SC-CNN-Based Circuit Using FTFN.
Turkish J. of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 13,
No. 1, pp. 39-50, 2005.
- [15] G. Giustolisi, and A. Rizzo.
CMOS Implementation of an Extended CNN Cell do Deal with
Complex Dynamics.
ISCAS 2003, Vol. 5, No., pp. 761-764, 2003.
- [16] R. Caponetto, M. Lavorgna, and L. Occhipinti.
Cellular Neural Networks in Secure Transmission Applications.
CNNA 1996, Vol., No., pp. 411-416, 1996.
- [17] P. Arena, S. Baglio, L. Fortuna, and G. Manganaro.
Experimental Signal Transmission Using Synchronised State
Controlled Cellular Neural Networks.
Electronics Letters, Vol. 32, No. 4, pp. 362-363, 1996.
- [18] M. Bucolo, L. Fortuna, M. Frasca and M. G. Xibilia.
A Generalized Chua Cell for Realizing any Continuous n-Segment
Piecewise-Linear Function.
Int. J. of Bifurcation and Chaos, Vol. 11, No. 9, pp. 2517-2527,
2001.
- [19] R. Kilic.
SC-CNN Based Multifunction Signal Generator.
Int. J. of Bifurcation and Chaos, Vol. 17, No. 12, pp. 4387-4393,
2007.
- [20] R. Kilic, M. Alci, and E. Gunay.
A SC-CNN-Based Chaotic Masking System with Feedback.

Int. J. of Bifurcation and Chaos, Vol. 14, No. 1, pp. 245-256, 2004.

- [21] E. Gunay, and M. Alci.
Experimental Confirmation of SC-CNN-Based Chaotic Masking System.
Int. J. of Bifurcation and Chaos, Vol. 15, No. 12, pp. 4013-4018, 2005.
- [22] L. O. Chua, and T. Roska.
Cellular Neural Networks and Visual Computing.
Cambridge University Press, UK, 2002.
- [23] L. O. Chua, C. A. Desoer, and E. S. Kuh.
Linear and Nonlinear Circuits.
McGraw-Hill, 1987.
- [24] H. J. Korsch, H.-J. Jod1, and T. Hartmann.
Chaos A Program Collection for the PC.
Springer, Third Edition, 2008.
- [25] Sandra Kahan.
Bifurcaciones Homoclínicas en el Circuito de Chua.
Tesis de Maestría.
- [26] Avant! Star-HSPICE Manual
Avant! Corporation and Avant! Subsidiary, 2001.
- [27] http://en.wikipedia.org/wiki/Chaos_theory