

OSCILADOR PERIÓDICO NO LINEAL EN ALTA FRECUENCIA, USANDO CCII'S

Hugo de León Hidalgo y Alejandro Díaz Sánchez
e-mail: hugodel@susu.inaoep.mx y adiazsan@inaoep.mx

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)
Luis Enrique Erro #1, Tonantzintla, Puebla, México. C.P. 72840
Tel/Fax: +52-222-2470517

Abstract

This paper presents the realization of one sinusoidal periodic oscillator using the method of State Variables. The state equation used is a variation of the Van der Pol equation, that use one nonlinear resistance to generate the limit cycle. The basic block to realize the functions of the circuit is a "Second Generation Current Conveyor (CCII)". The state equation is modified to increase the operating frequency of the circuit and to reduce the oscillation amplitude. The circuit is simulated in HSPICE. They are shown the results of the analyses realized in the phase, time and frequency domain. The operating frequency achieved is approximately of 7MHz, and the oscillation amplitude is close to $\pm 0,5V$. The technology parameters used in the simulation of the circuit are from AMS 0.35 μm . The biasing voltage was $\pm 2,5V$.

Resumen

En este artículo se presenta la realización de un oscilador periódico sinusoidal utilizando el método de Variables de Estado. La ecuación de estado usada es una variación de la ecuación de Van der Pol, que usa una resistencia no lineal para generar el ciclo límite. El bloque básico para realizar funciones del circuito es un "Current Conveyor de Segunda Generación (CCII)". La ecuación de estado es modificada para incrementar la frecuencia de operación del circuito y para reducir la amplitud de la oscilación. El circuito es simulado en HSPICE. Se muestran resultados de los análisis realizados, en fase, tiempo y frecuencia. La frecuencia de operación obtenida es aproximadamente de 7 MHz, y la amplitud de oscilación está alrededor de $\pm 0,5V$. Los parámetros tecnológicos utilizados para la simulación del son de AMS 0.35 μm . El nivel de polarización fue $\pm 2,5V$.

OSCILADOR PERIÓDICO NO LINEAL EN ALTA FRECUENCIA, USANDO CCII'S

Hugo de León Hidalgo y Alejandro Díaz Sánchez
e_mail: hugodel@susu.inaoep.mx y adiazsan@inaoep.mx

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE),
Luis Enrique Erro #1, Tonantzintla, Puebla, México. C.P. 72840
Tel/Fax: +52-222-2470517

RESUMEN

En este artículo se presenta la realización de un oscilador periódico sinusoidal utilizando el método de Variables de Estado. La ecuación de estado usada es una variación de la ecuación de Vandepol, que usa una resistencia no lineal para generar el ciclo límite. El bloque básico para realizar funciones del circuito es un "Current Conveyor de Segunda Generación (CCII)". La ecuación de estado es modificada para incrementar la frecuencia de operación del circuito y para reducir la amplitud de la oscilación. El circuito es simulado en HSPICE. Se muestran resultados de los análisis realizados, en fase, tiempo y frecuencia. La frecuencia de operación obtenida es aproximadamente de 7 MHz, y la amplitud de oscilación está alrededor de $\pm 0,5V$. La tecnología utilizada para la simulación eléctrica del circuito fue AMS 0.35 μm . El nivel de polarización fue $\pm 2,5V$.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las técnicas de diseño de osciladores sinusoidales es la utilización de circuitos no lineales (principalmente resistencias no lineales). Estas últimas se han realizado usualmente de manera lineal a trozos (PWL) por medio de amplificadores operacionales, OTA's y otros tipos de circuitos [1][2].

Una de las características de estos circuitos es su poca capacidad de integración en IC's. Esto es debido principalmente a que estos circuitos necesitan del uso de inductores y de valores de capacitores fuera del rango que pueda usarse en aplicaciones monolíticas [3] y, en caso de que dichos inductores puedan ser emulados por medio de GIC's y se usen multiplicadores de capacitancias, esto implica el uso de una circuitería muy compleja. Además, la amplitud de oscilación del circuito, determinado por los parámetros de la ecuación de estado, fre-

cuentemente está fuera del rango normal de operación en tecnologías submicrométricas.

En este artículo se presenta la realización de un circuito oscilador sinusoidal que opera en el rango de unos cuantos megahertz. Se usa el método de variables de estado para implementar la ecuación de estado del circuito, de modo que pueda ser realizado en circuitos integrados. Las funciones básicas del circuito (Resistencia No Lineal e integradores) son realizadas por medio de un current Conveyor de Segunda Generación (CCII) [4] como bloque de construcción del circuito. El circuito fue simulado por medio de la herramienta de simulación de circuitos HSPICE. La tecnología usada fue AMS 0.35 μm .

En la sección 2 se describe el comportamiento del circuito y la ecuación que lo representa. La sección 3 describe brevemente el método de variables de estado y muestra la representación del circuito con el método mencionado. En la sección 4 se introducen los CCII's y se muestran los circuitos que realizan la resistencia no lineal y la ecuación de estado. El diseño y simulación del circuito se presentan en la sección 5. Por último las conclusiones son propuestas en la sección 6.

2. DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO

El diagrama eléctrico del circuito oscilador periódico sinusoidal presentado es el que se muestra en la figura 1a y la característica de la resistencia no lineal se muestra en la figura 1b.

El funcionamiento del circuito es como se describe a continuación. El inductor y capacitor conectados en paralelo forman un circuito tanque que, de manera ideal (sin ninguna resistencia), funciona como un oscilador sinusoidal sin pérdidas. Cuando al circuito se conecta la resistencia no lineal, para valores muy pequeños del voltaje V_C , esta resistencia es una resistencia activa (su curva característica se encuentra ubicada en el segundo

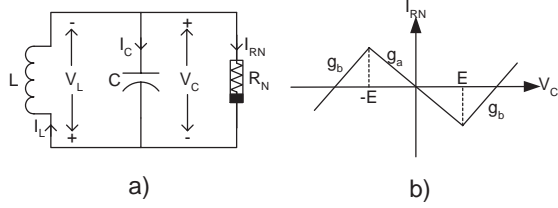


Figura 1: Diagrama eléctrico del circuito Oscilador periódico no lineal

o cuarto cuadrantes) y suministra potencia al circuito, de forma que el circuito se comporta como un oscilador creciente en amplitud. Cuando el voltaje del capacitor ha crecido lo suficiente, de forma tal que la resistencia no lineal pasa de ser una resistencia activa a una pasiva, ubicándose en el primer y tercer cuadrantes, y por lo tanto la oscilación tiende a ser descendente en amplitud. El resultado es que, aproximadamente, en el punto en el que la resistencia pasa de ser activa a pasiva se da un equilibrio de fuerzas en las tendencias ascendente y descendente de la oscilación, y el comportamiento del circuito es el de un oscilador, cuya curva en el espacio de fase es conocida como “ciclo límite” que, en el mejor de los casos, genera una onda sinusoidal pura.

Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito son las siguientes

$$\frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L}V_C \quad (1)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C}I_L - \frac{1}{C}I_{R_N} \quad (2)$$

La resistencia no lineal (representada por el término I_{R_N}) está dada por la siguiente expresión

$$I_{R_N} = \begin{cases} g_b V_C + (g_b - g_a)E & \text{Si } V_C < -E \\ g_a V_C & \text{Si } -E \leq V_C \leq E \\ g_b V_C + (g_a - g_b)E & \text{Si } V_C > E \end{cases} \quad (3)$$

3. MÉTODO DE VARIABLES DE ESTADO

El método de variables de estado es una forma muy útil de implementar ecuaciones de estado que modelen el comportamiento de un circuito. Este método realiza de manera indirecta, por medio de sumadores, integradores y multiplicadores una ecuación de estado. Las ecuación de estado, dada por las ecuaciones (1) y (2), es ahora

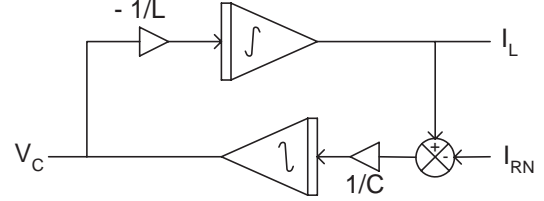


Figura 2: Representación en Variables de estado del circuito oscilador periódico

expresada de manera integral

$$I_L = -\frac{1}{L} \int V_C dt \quad (4)$$

$$V_C = \frac{1}{C} \int I_L dt - \frac{1}{C} \int I_{R_N} dt \quad (5)$$

A partir de esta ecuación, la representación en Variables de estado del circuito oscilador periódico es la que se muestra en la figura 2.

4. CCII'S Y FUNCIONES DEL CIRCUITO

4.1. Definición de un CCII

Los CCII's son bloques de construcción de circuitos que permiten realizar diversos tipos de funciones que, normalmente, se han realizado por medio de otros tipos de circuitos tales como Opamps y OTA's. Su comportamiento puede caracterizarse de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} i_y \\ v_x \\ i_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ i_x \\ v_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

Un CCII puede ser considerado como un dispositivo compuesto por un seguidor de voltaje y un seguidor de corriente en cascada o, para ciertas aplicaciones, como un transconductor cuya transconductancia está dada por la resistencia conectada de manera externa a la terminal 'X'. El diagrama esquemático de un CCII se muestra en la figura 3.

Este circuito es 'positivo' (CCII+) si el sentido de la corriente en la terminal 'Z' es como se muestra en la figura, y es 'negativo' (CCII-) si es contrario a él.

El CCII+ [5] usado para la realización de las funciones del circuito oscilador se muestra en la figura 4.

Un análisis de pequeña señal realizado al circuito, usando algunas aproximaciones comunes, permitió obtener las siguientes ecuaciones:

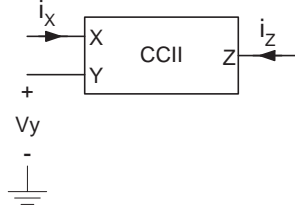


Figura 3: Símbolo de un CCII

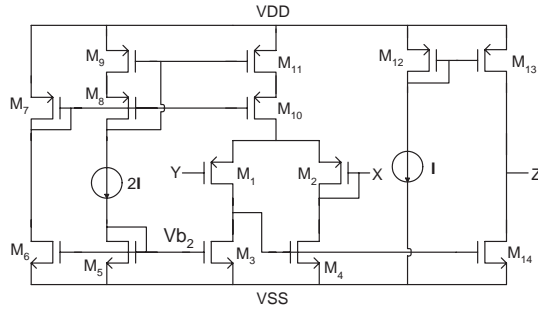


Figura 4: CCII positivo

$$r_X = \frac{(gm_1)(gds_3) + (gm_2)(gds_3) + (gm_2)(gds_1)}{(gm_1)(gm_2)(gm_4)} \quad (7)$$

$$A_V = 1 \quad (8)$$

De estas ecuaciones se puede observar que las características presentadas por el circuito CCII, en términos de resistencia de salida y ganancia de voltaje, son adecuadas para la realización del circuito.

4.2. Realización de las funciones del circuito

El circuito que realiza la ecuación de estado se muestra en la figura 5. [6] Este está compuesto por dos integradores, realizados con CCII's, y la resistencia no lineal.

Tal como se ve en la figura, las variables importantes (I_L y V_C) son sensadas por capacitores, y están dadas en términos de voltajes. La ecuación integral que modela al circuito de la figura 5 es la siguiente

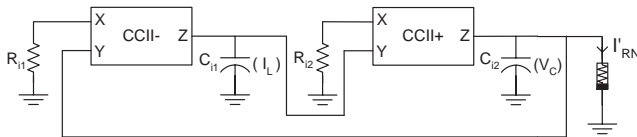


Figura 5: Circuito que realiza la ecuación de estado

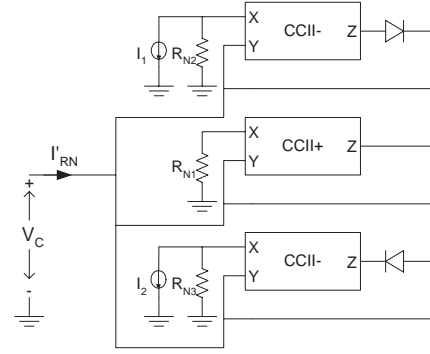


Figura 6: Resistencia no lineal

$$I_L = -\frac{1}{R_{i1}C_{i1}} \int V_C dt \quad (9)$$

$$V_C = \frac{1}{R_{i2}C_{i2}} \int I_L dt - \frac{1}{C_{i2}} \int I'_{RN} dt \quad (10)$$

El circuito que realiza la resistencia no lineal es el que se muestra en la figura 6. Este se compone por tres CCII's, cada uno de los cuales forma una sección de la resistencia lineal a tramos (PWL).

En total, el circuito oscilador usa cinco CCII's con sus respectivas polarizaciones, dos capacitores, dos diodos, cinco resistencias lineales y dos fuentes de corriente.

5. DISEÑO Y SIMULACIÓN

5.1. Diseño y simulación numérica

Para obtener los valores de los parámetros de la ecuación de estado (ecuaciones (1) y (2)), se realizó una aproximación lineal al circuito de la figura 1. Esto se debió a que no se tienen ecuaciones de diseño del circuito no lineal completo, y a que el circuito es lineal por tramos (PWL), lo que hace posible analizarlo como un circuito lineal de manera local y posteriormente hacer consideraciones generales de su no linealidad.

Partiendo de las ecuaciones que describen a un circuito RLC en paralelo, con R como una resistencia 'lineal', se tiene

$$x(t) = e^{-\alpha t} \cos(\omega_d t - \theta) \quad (11)$$

donde

$$\alpha = \frac{1}{2RC}, \quad \omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}, \quad \text{y} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (12)$$

donde $x(t)$ puede ser cualquiera de las variables de estado.

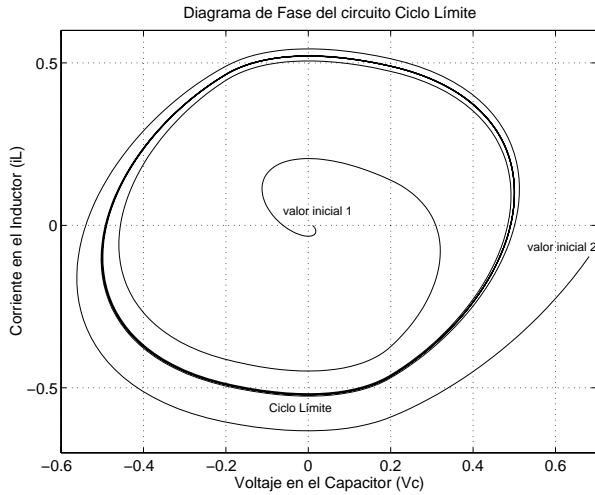


Figura 7: Integración numérica de la ecuación de estado (Diagrama de fase)

De acuerdo a estas ecuaciones se pueden distinguir tendencias a seguir en el diseño, estas son:

1. Es deseable que α sea suficientemente pequeña de forma tal que la trayectoria entre al ciclo límite suavemente, y de esta forma la onda periódica sea muy semejante a una onda senoidal; pero suficientemente grande para que el transitorio no se prolongue demasiado.
2. Se deben considerar los valores que han de tomar los elementos del circuito con el objetivo de que sean valores integrables. Esto implica que, al asignar valores a los parámetros de la ecuación de estado, debe analizarse que éstos permitan que los correspondientes valores de los elementos del circuito sean valores que puedan usarse en circuitos integrados.
3. Bajo la consideración del punto 1, la frecuencia de operación depende casi completamente de los valores de L y C y muy poco de la resistencia R.

En base a estas consideraciones, los siguientes valores fueron propuestos

$$L = 20e - 9H, C = 20e - 9F, R = 1\Omega \quad (13)$$

El valor calculado de frecuencia es $f = 6,9MHz$.

Se realizó la integración numérica de la Ecuación de Estado por medio de el lenguaje de programación Matlab usando el método numérico Runge-Kutta de 4º orden y dando los valores calculados.

La figura 7 muestra el comportamiento del circuito en el diagrama del espacio de fase para dos valores iniciales dados, uno interno y el otro externo al ciclo límite.

Como se ve, las trayectorias iniciadas en ambos valores tienden al ciclo límite. Además, puede observarse que el transitorio es muy pequeño, esto es, la trayectoria entra de manera muy rápida al ciclo límite. Esto provocará que la forma de onda no sea exactamente una onda senoidal. Sin embargo, esto se hace así ya que, como se verá más adelante, el circuito presenta limitaciones que restringen el diseño.

Es importante observar, además, que la amplitud de la oscilación ha sido reducida al modificar los valores de los parámetros de la ecuación de estado de tal forma que, la amplitud es suficientemente pequeña y se elimina con ello una restricción para que el circuito pueda implementarse en IC's.

La forma de onda en el tiempo para cada una de las variables de estado se muestra en la figura 8. En ellas se observa que, efectivamente, la oscilación presenta bastante distorsión.

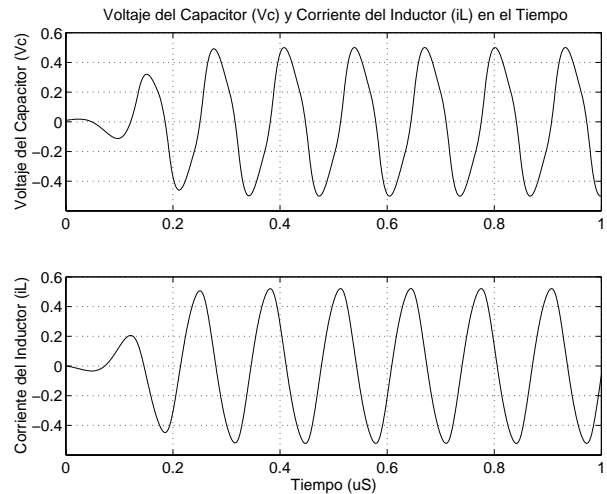


Figura 8: Integración numérica de la ecuación de estado (Descripción en el Tiempo)

Por último, se realizó un análisis espectral para conocer la respuesta en frecuencia de la ecuación de estado. Se utilizaron para ello 32768 puntos del análisis en el tiempo. La gráfica de la respuesta en frecuencia se muestra en la figura 9

La frecuencia fundamental, tal como puede verse en la figura, es aproximadamente $f = 7,5MHz$, alrededor de la frecuencia calculada anteriormente. Se observa también una armónica de tercer orden presente cuyo valor es bastante grande. Esto es consecuencia de que la trayectoria entra al ciclo límite de manera muy rápida y por tanto, de que la curva en el diagrama de fase no es exactamente un círculo. Es esta armónica la que provoca que la onda sinusoidal esté distorsionada.

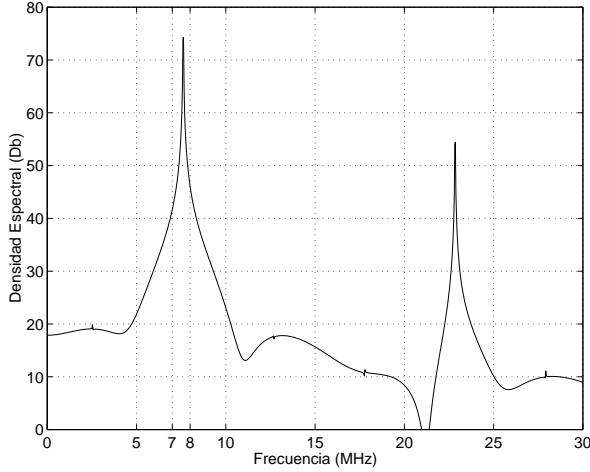


Figura 9: Integración numérica de la ecuación de estado (Respuesta en frecuencia)

5.2. Diseño y simulación del circuito

Para obtener los valores de los elementos del circuito se hace una igualación de las ecuaciones de integración, esto es, se igualan los coeficientes de las ecuación (4) con los de (9), y los de la ecuación (5) con los de (10) de los cuales se obtienen las siguientes igualdades

para la primera igualación de ecuaciones (variable I_L)

$$L = R_{i1}C_{i1} \quad (14)$$

Y para la segunda igualación de ecuaciones (variable V_C)

$$C = R_{i2}C_{i2} \quad (15)$$

$$\frac{1}{C} \int I_{RN} dt = \frac{1}{C_{i2}} \int I'_{RN} dt = \frac{1}{R_{i2}C_{i2}} \int I_{RN} dt \quad (16)$$

Como puede verse, en la ecuación (16) se hace un artificio, ya que el valor de C en la ecuación (15) está igualada al producto del valor de una resistencia y una capacitancia ($C = R_{i2}yC_{i2}$), y en la ecuación (16) está igualada sólo al valor de la capacitancia.

El artificio consiste en dividir la conductancia de la resistencia no lineal (i'_{RN}) por el valor de la resistencia (R_{i2}) y factorizarla, de tal forma que $C = R_{i2}C_{i2}$ en ambas ecuaciones ((15) y (16)).

Los valores finales de los elementos del circuito se muestran a continuación:

$$R_{i1} = R_{i2} = 10k\Omega, R_{N_1} = 10k, R_{N_2} = R_{N_3} = 5k\Omega, \\ C_{i1} = C_{i2} = 2pF$$

Los valores de las resistencias son factibles de realizarse en IC's. Los valores de los capacitores C_{i1} y

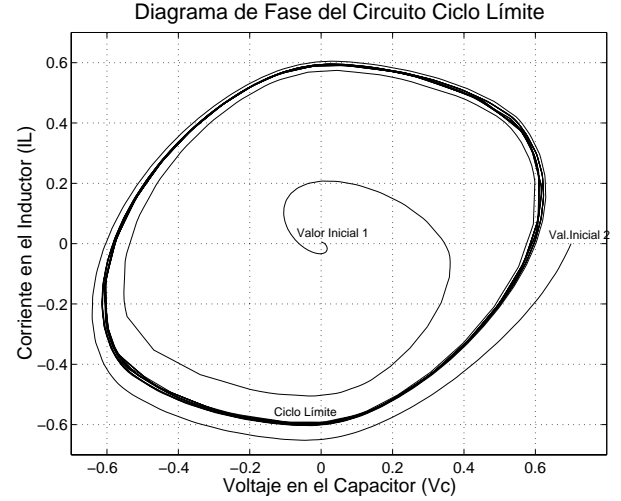


Figura 10: Simulación en Hspice del circuito oscilador periódico (Diagrama de Fase)

C_{i2} fueron escogidos grandes de forma que las capacitancias parásitas no tuvieran un efecto apreciable en el comportamiento del circuito. Si estos valores fueran reducidos a la mitad, los valores de las resistencias R_{i1} y R_{i2} tendrían que ser duplicadas.

Se realizó la simulación del circuito con los valores calculados en el simulador de circuitos HSPICE. El nivel de voltaje de polarización usado fue $\pm 2,5V$. Los resultados se muestran a continuación.

El diagrama de fase se muestra en la figura 10.

Al igual que en la simulación de la ecuación de estado, se dieron dos valores iniciales al sistema, uno interno al ciclo límite y otro externo, y, como puede verse en la figura 10, las trayectorias convergieron a éste. Se observa, además, que la forma de la curva es semejante y que los valores de amplitud tanto para I_L como para V_C son comparables con aquellos (figura 7). La convergencia al ciclo límite en ambos casos se da con la misma rapidez.

En la figura 11 se muestran el comportamiento en el tiempo de ambas variables de estado (I_L y V_C). Puede notarse la similitud en forma, amplitud y frecuencia con aquellas de la figura 8.

Por último mostramos el análisis espectral realizado al circuito, para ello se utilizaron 32768 puntos de la respuesta en el tiempo. Este análisis se muestra en la figura 12.

Se encuentra que la frecuencia está alrededor de $f = 7MHz$. Puede verse que la componente de tercer orden, al igual que en el caso anterior (figura 9), es la principal contribución a la distorsión de la forma de onda sinusoidal final.

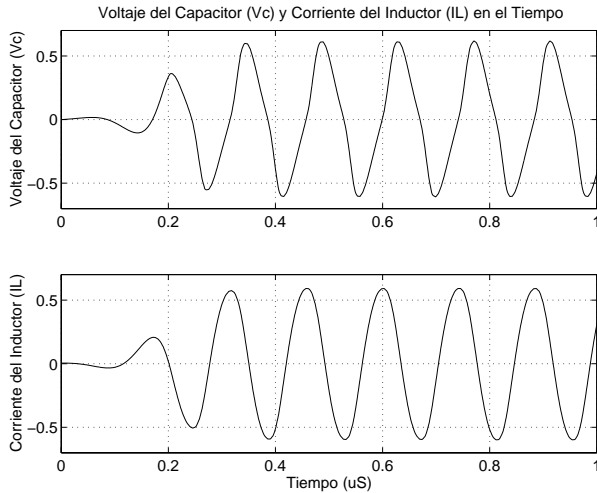


Figura 11: Simulación en Hspice del circuito oscilador periódico (Comportamiento en el tiempo)

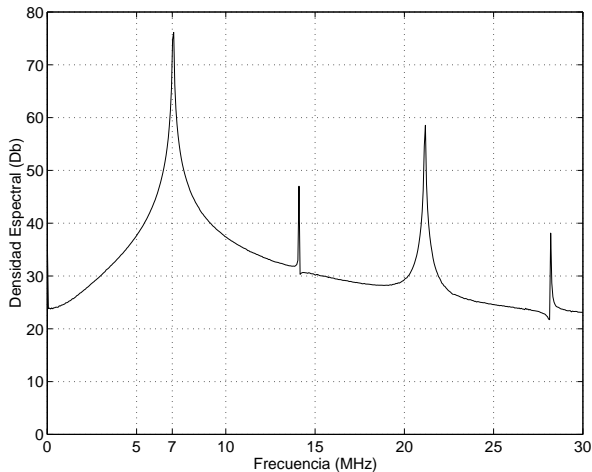


Figura 12: Simulación en Hspice del circuito oscilador periódico (Respuesta en frecuencia)

6. CONCLUSIONES

En este artículo se describe el proceso de diseño de un circuito oscilador periódico sinusoidal. Se toma la ecuación de estado que describe al circuito y se modifican los valores de sus parámetros con el objetivo de bajar la amplitud de oscilación de las variables de estado del circuito y de incrementar la frecuencia de oscilación de éste. Las ecuación de estado es implementada por medio del método de variable de estado. Se utilizan Current Conveyors para realizar las operaciones básicas del circuito.

Se encontró una oscilación sinusoidal de aproximadamente 7 MHz, que presenta cierto grado de distorsión dada, principalmente, por la fuerte contribución de la

armónica de tercer orden, originada por los valores de los parámetros de la ecuación de estado. Estos valores son restringidos por lo valores de los elementos del circuito de tal forma que sean integrables.

Se presentan resultados de la simulación del circuito realizada. La tecnología usada es AMS 0.35 μ m y el nivel de polarización es ± 2.5 V.

Referencias

- [1] León O. Chua, Charles A. Desoer, and Ernest S. Kuh, editors. *Linear and Nonlinear Circuits*. McGraw Hill, 1987.
- [2] Edgar Sánchez Sinencio, Jaime Ramírez Angulo, Bernabé Linares Barranco, and Angel Rodríguez Vázquez. "OTA-Based Non-linear Function Approximations". Technical report, Department of Electrical Engineering, Texas A and M University and Departamento de Electrónica y Electromagnetismo Universidad de Sevilla, Spain, 1989.
- [3] Valentin Drogoreanu and Dragos Vizireanu. "A class of MOS non-linear negative resistance oscillators". Politechnical University of Bucharest, Romania and Georgia Tech Lorraine, Metz, France.
- [4] C. Toumazou, F. J. Lidgey, and D. G. Haigh, editors. *Analogue IC Design: the current mode approach*. Peter Peregrinus Ltd., 1993.
- [5] G. Palmisano and G. Palumbo. "A Simple CMOS CII+". *IEICE Trans. Fundamentals*, E81-A(6):1164–1167, June 1998.
- [6] Hugo de León H. "Diseño de un Oscilador Caótico para Aplicaciones en Altas Frecuencias". Tesis de Maestría, INAOE, Puebla. Febrero 2002.