



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ELECTRÓNICA DEL ESTADO SÓLIDO



Emulador Analógico de Memristor

Alumno:

Marco Antonio Quezada López

Asesores:

Dr. Felipe Gómez Castañeda

Dr. José Antonio Moreno Cadenas

Contenido

- Motivación
- Objetivos
- Introducción al memristor
 - Características
 - Modelo de HP (arrastre lineal de iones)
 - Modelo VTEAM
- Emuladores
 - Diferencia de potencial
 - MOSFET en la región del triodo (resistencia variable)
- Aplicaciones
 - Oscilador de onda triangular
 - Oscilador caótico

Motivación

Estudio de memristores

- Escalamiento de CMOS
- Aumento en la capacidad de memorias
- En CMOS al aumentar la frecuencia aumenta el consumo de potencia
- Aplicaciones en: circuitos analógicos programables (filtros adaptativos), circuitos neuromórficos, sistemas caóticos, circuitos digitales (memorias, implementación de funciones lógicas)

Desarrollo de emuladores

- Proporcionar una herramienta que permita desarrollar aplicaciones con las características de los memristores, siendo éstas fáciles de ajustar si la aplicación lo requiere.

objetivos

Objetivo general

- Realizar la implementación de circuitos emuladores analógicos de memristores, usando elementos discretos y cuyas características vayan de acuerdo con las establecidas por algunos de los principales modelos matemáticos de los memristores.

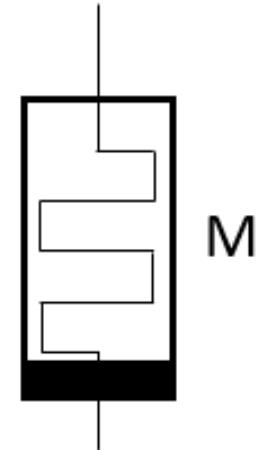
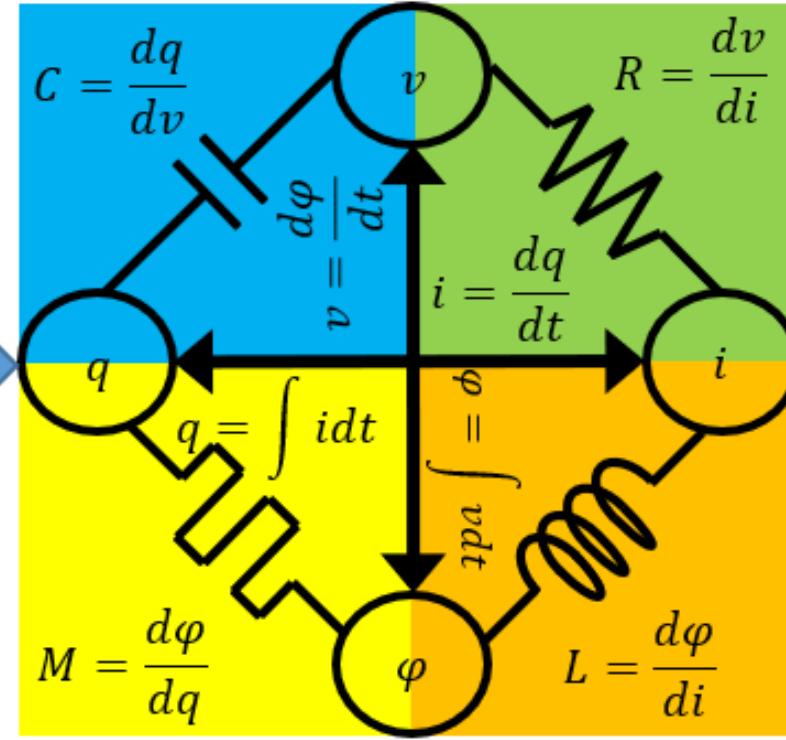
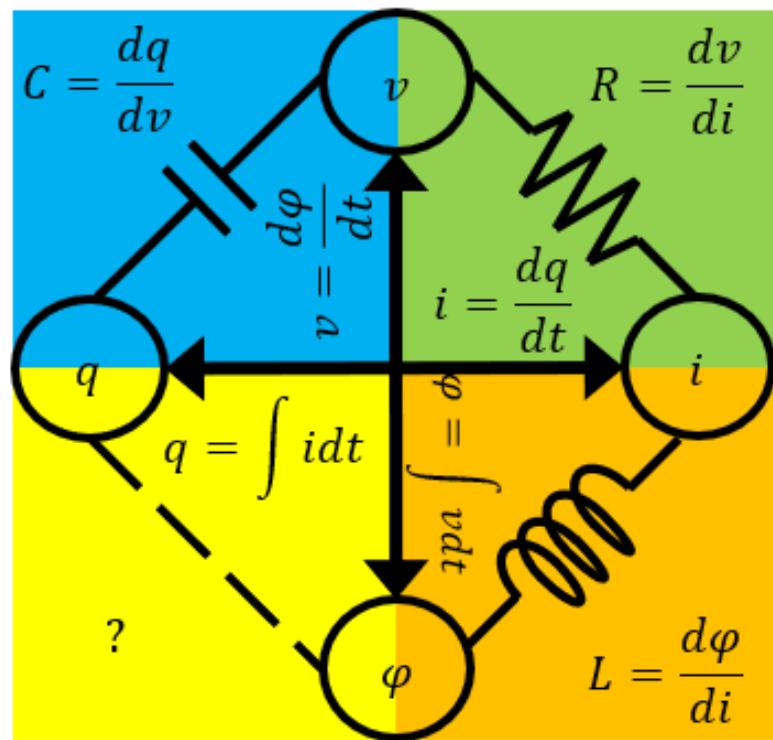
Objetivos particulares

- Simulación de modelos matemáticos del memristor de HP y TEAM - VTEAM, utilizando Matlab y Simulink, a fin de identificar los distintos tipos de comportamiento que los memristores pueden tener (incremental o decremental).
- Simulación de circuitos en SPICE para identificar cada uno de sus componentes, la función que éstos desempeñan y como relacionarlos con los modelos matemáticos en los cuales basan su funcionamiento.
- Implementación física de los emuladores en tablillas de conexiones o “*protoboard*” para comprobar el funcionamiento de los circuitos emuladores, una vez que se ha hecho su simulación y, si es necesario, realizar el ajuste requerido.
- Realizar aplicaciones usando los circuitos emuladores desarrollados, con el fin de aprovechar las características de los memristores y para comprobar su correcto funcionamiento, las cuales consisten en un oscilador de onda triangular y un oscilador caótico.

Contenido

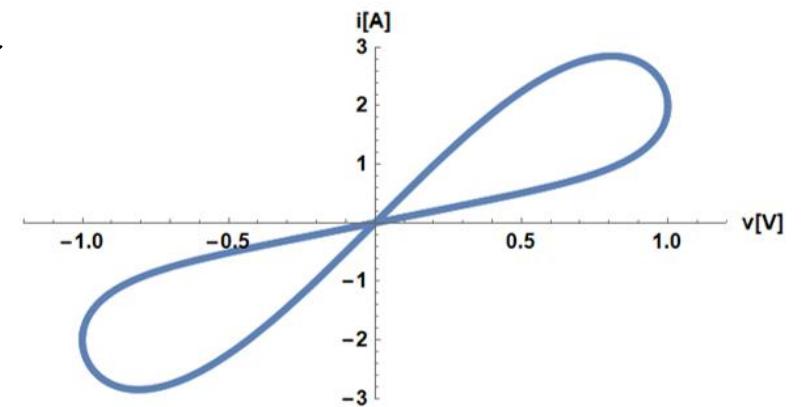
- Motivación
- Objetivos
- Introducción al memristor
 - Características
 - Modelo de HP (arrastre lineal de iones)
 - Modelo VTEAM
- Emuladores
 - Diferencia de potencial
 - MOSFET en la región del triodo (resistencia variable)
- Aplicaciones
 - Oscilador de onda triangular
 - Oscilador caótico

EI Memristor

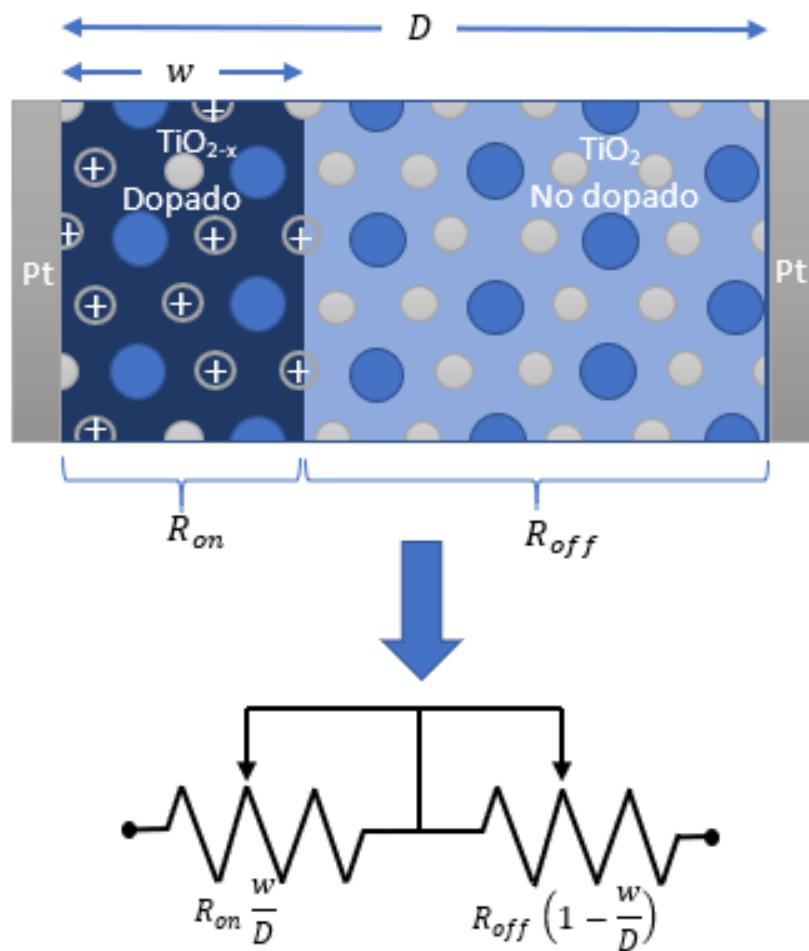


características

- Comutación entre estados resistivos R_{off} y R_{on}
- Histéresis de la curva i-v pinchada en el origen.
- El área de los lóbulos debe decrecer conforme la frecuencia aumenta.
- Conforme la frecuencia aumenta la curva de histéresis se hace una función monovaluada.
- Amplio intervalo de resistencia entre R_{off} y R_{on}
- Memoria no volátil.



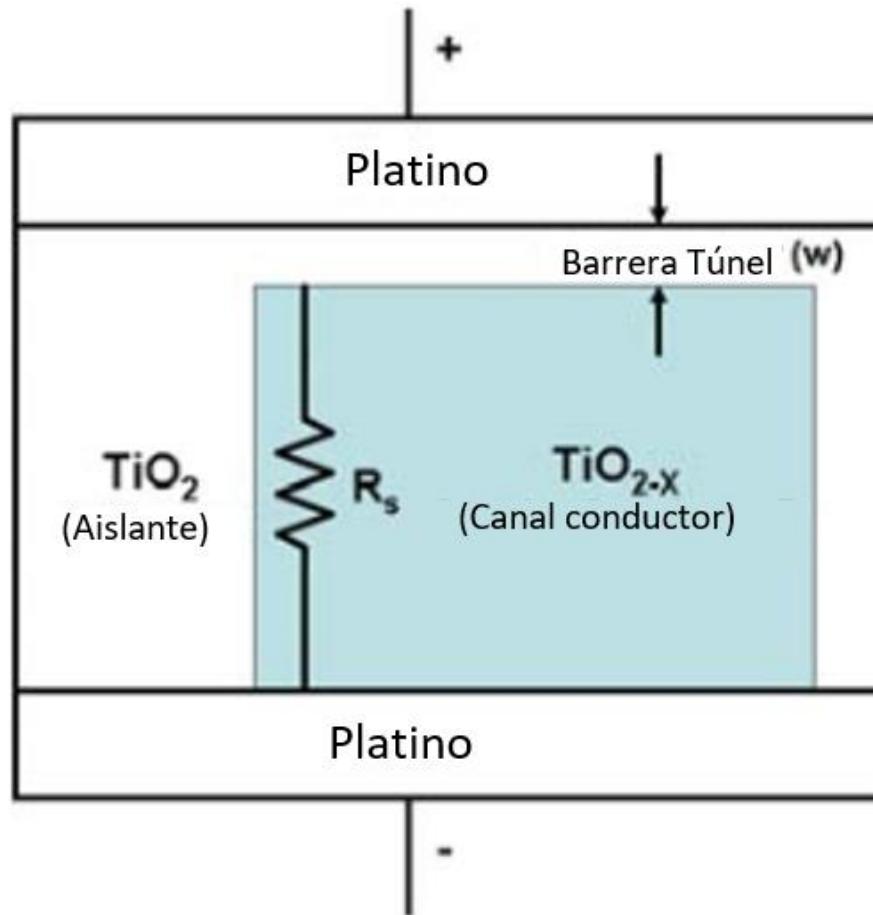
Modelo de arrastre lineal de iones (HP)



$$v(t) = \left(R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off} \left(1 - \frac{w(t)}{D}\right) \right) i(t)$$

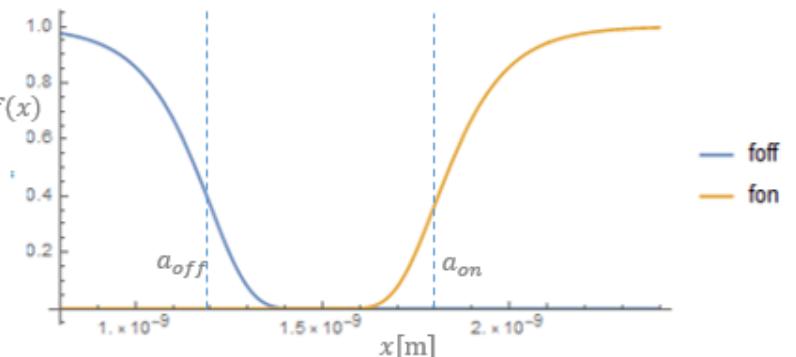
$$\frac{dw}{dt} = \mu_v \frac{R_{on}}{D} i(t) f(w)$$

Modelo VTEAM



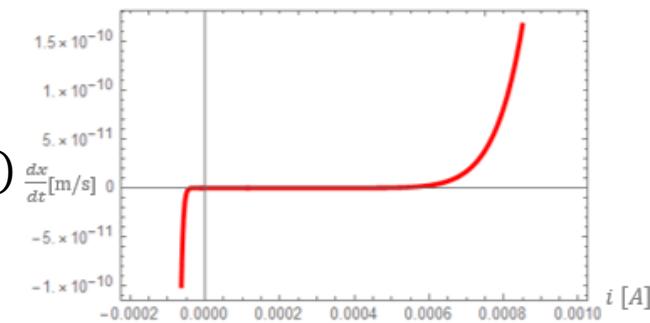
- $$\frac{dw(t)}{dt} \begin{cases} K_{off} \cdot \left(\frac{v(t)}{v_{off}} - 1 \right)^{\alpha_{off}} \cdot f_{off}(w), & v_{off} < v(t) \\ 0, & v_{on} < v(t) < v_{off} \\ K_{on} \cdot \left(\frac{v(t)}{v_{on}} - 1 \right)^{\alpha_{on}} \cdot f_{on}(w), & v(t) > v_{on} \end{cases}$$

- $f_{off}(x) = e^{-e^{\frac{x-a_{off}}{w_c}}}$
- $f_{on}(x) = e^{-e^{-\frac{x-a_{on}}{w_c}}}$



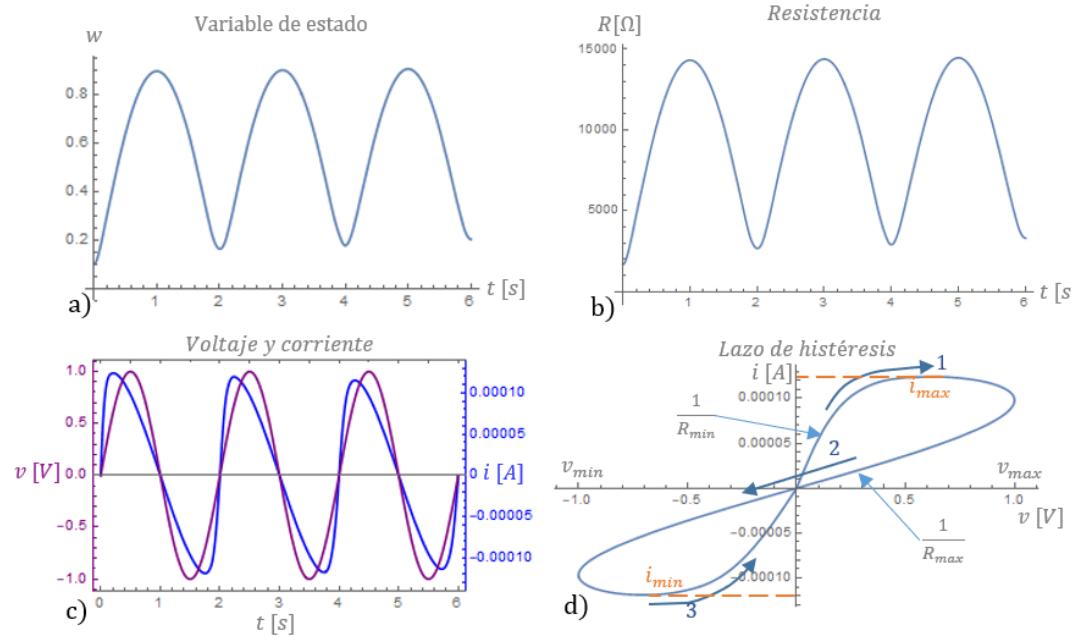
- $i(t) = \left[R_{on} + \frac{R_{off}-R_{on}}{w_{off}-w_{on}} \cdot (w - w_{on}) \right]^{-1} \cdot v(t)$

- $i(t) = \frac{e^{-\frac{\lambda}{w_{off}-w_{on}} \cdot (w-w_{on})}}{R_{on}} \cdot v(t)$

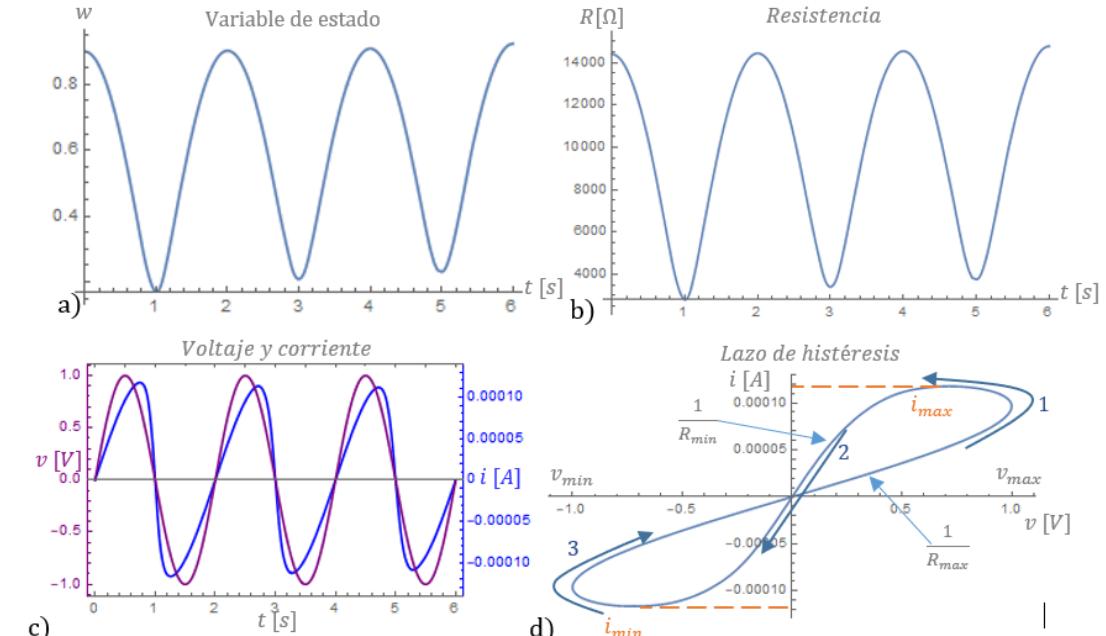


Comportamiento incremental y decremental

Incremental



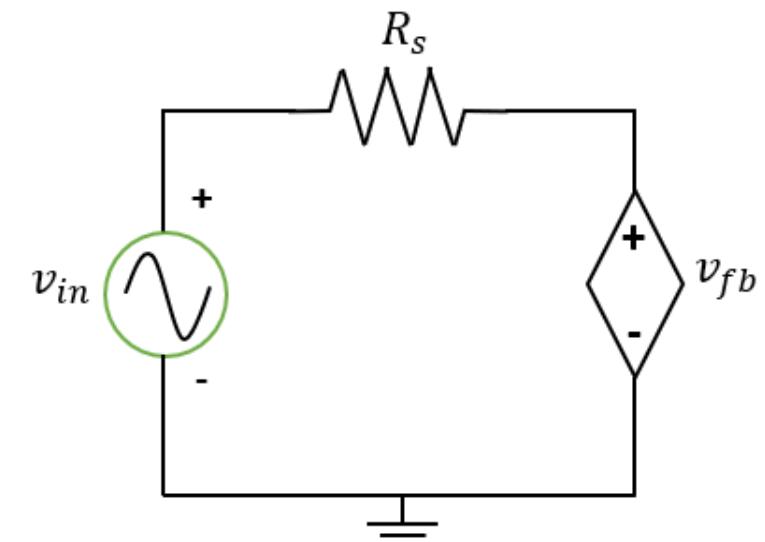
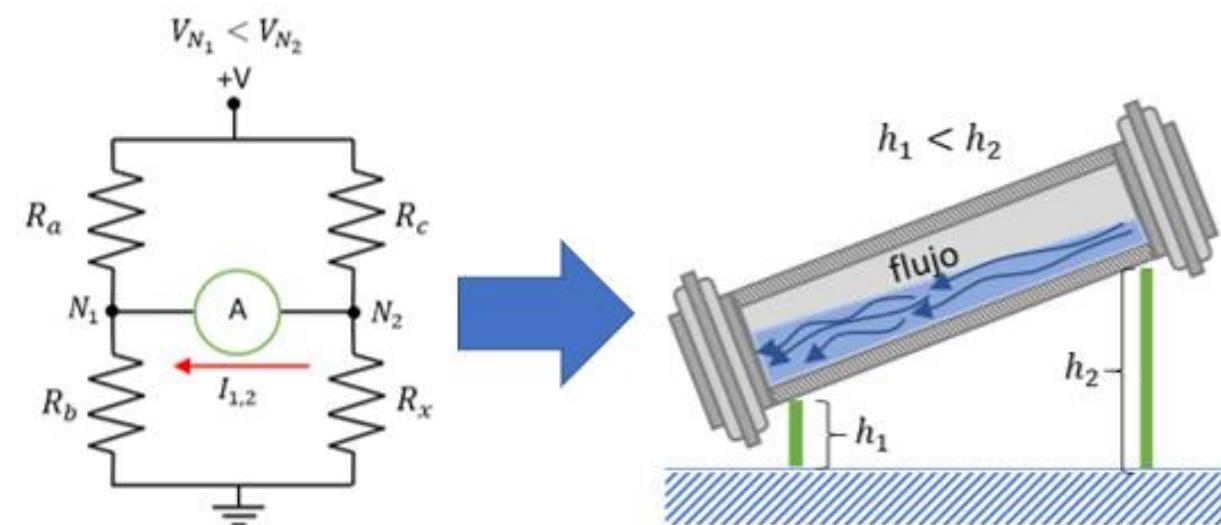
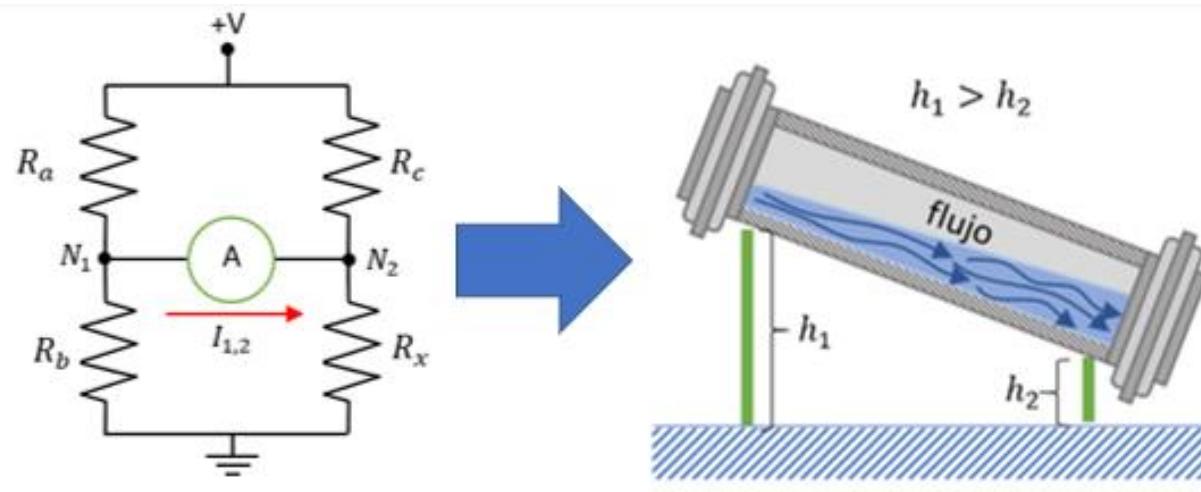
Decremental



Contenido

- Motivación
- Objetivos
- Introducción al memristor
 - Características
 - Modelo de HP (arrastre lineal de iones)
 - Modelo VTEAM
- Emuladores
 - Diferencia de potencial
 - MOSFET en la región del triodo (resistencia variable)
- Aplicaciones
 - Oscilador de onda triangular
 - Oscilador caótico

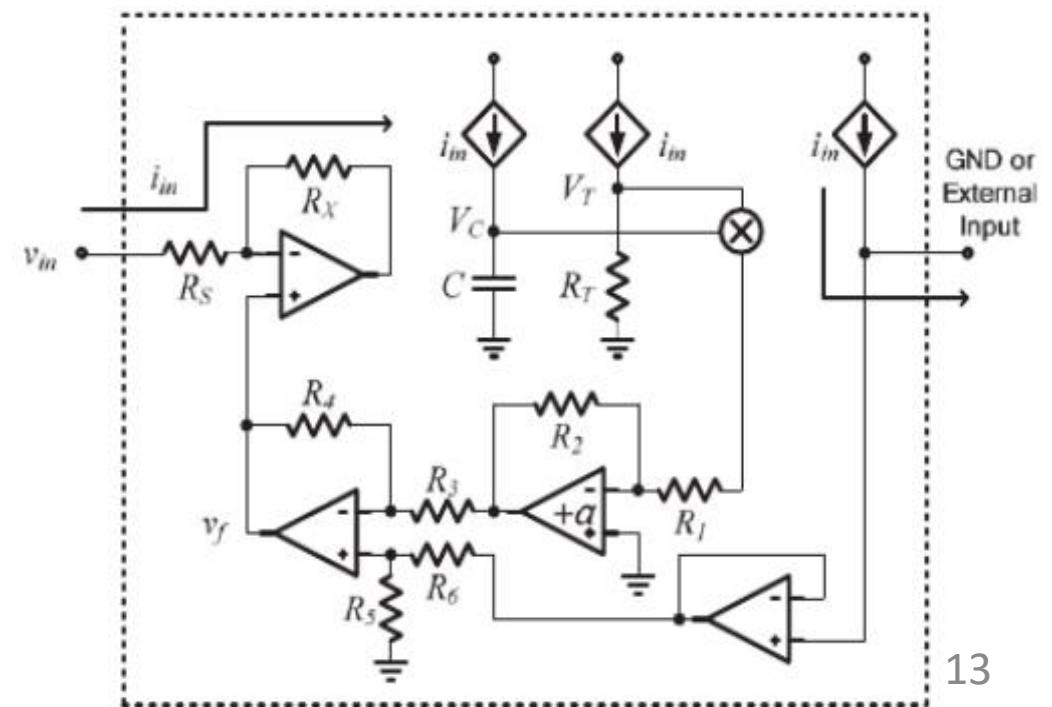
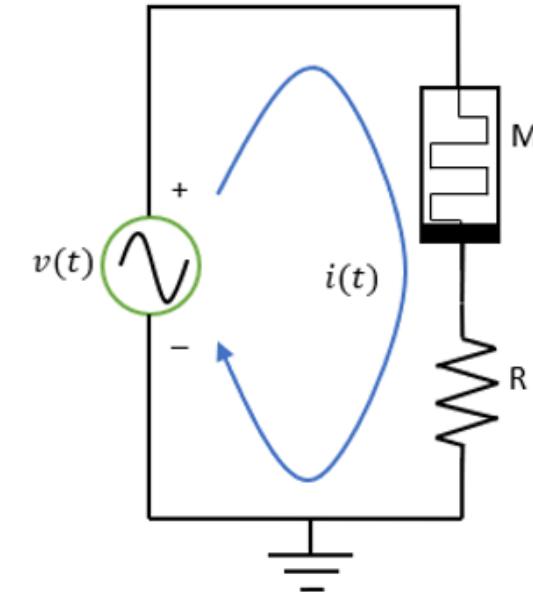
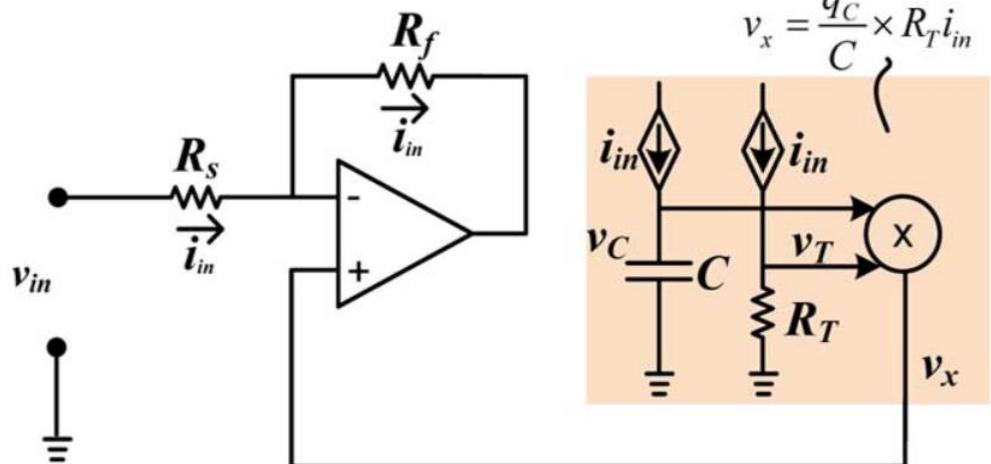
Diferencia de potencial



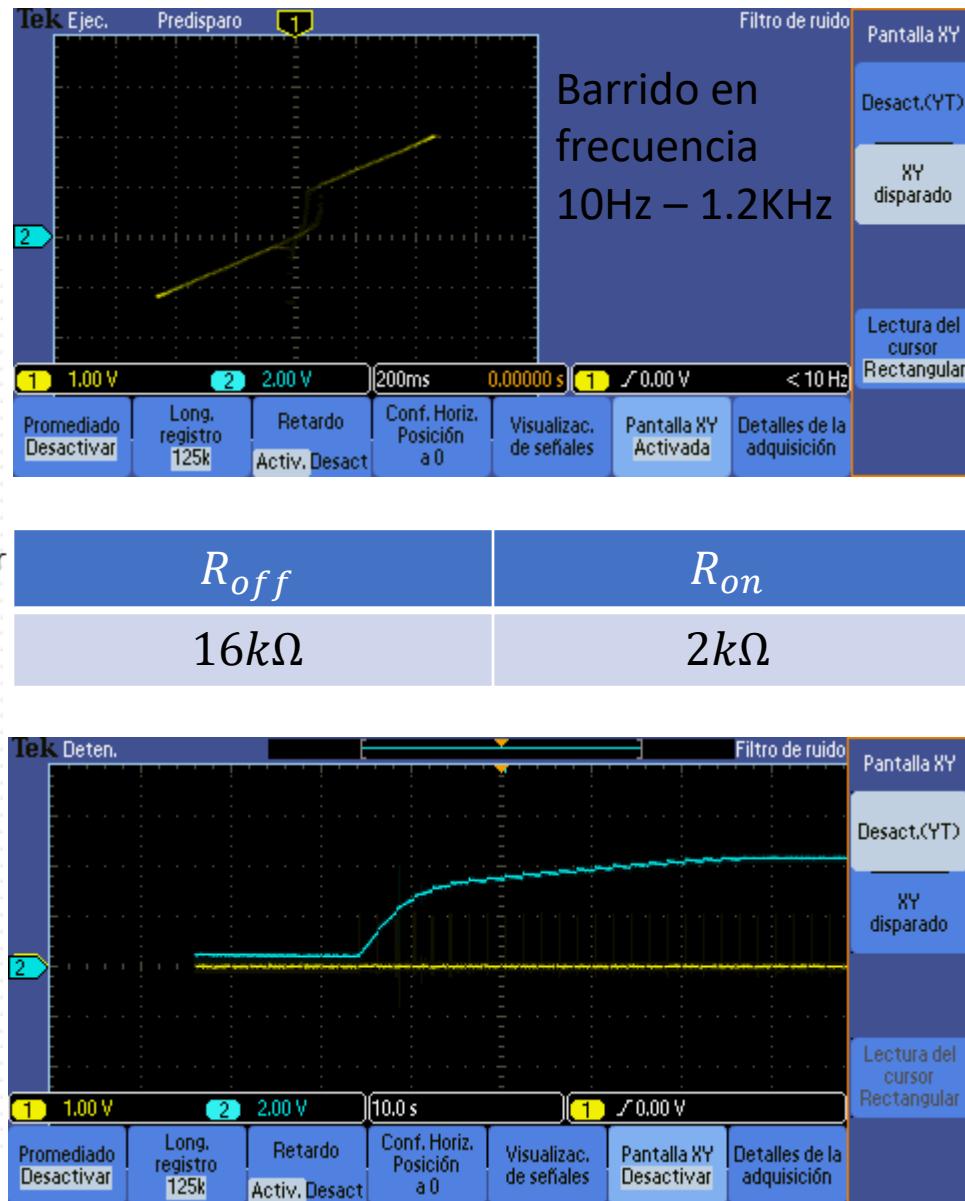
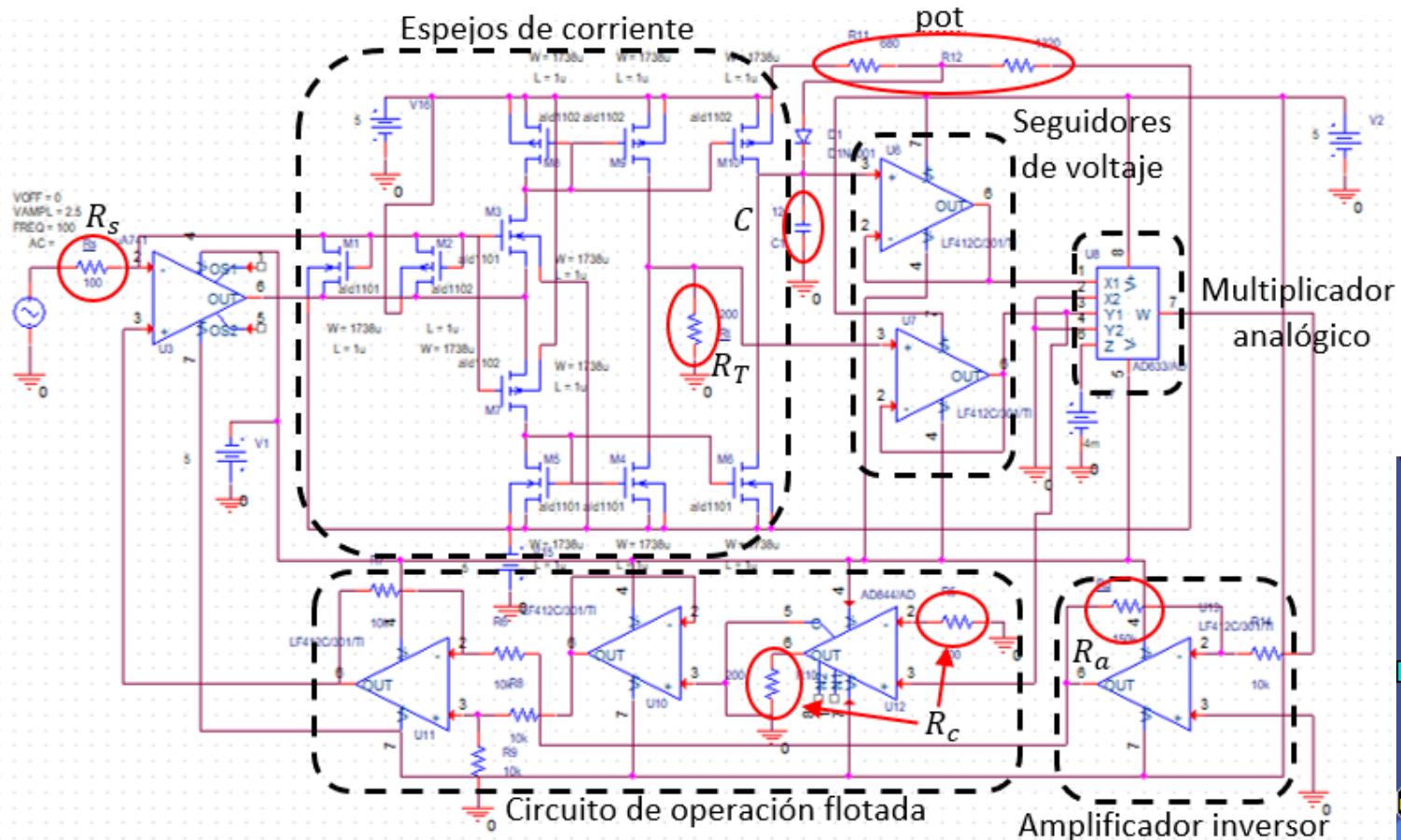
$$v(t) = \left(R_{on} \frac{w(t)}{D} + R_{off} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \right) i(t)$$

$$v(t) = i(t) \frac{w(t)}{D} (R_{on} - R_{off}) + i(t) R_{off}$$

$$v_{in}(t) = i_{in}(t) R_s - \alpha R_t v_c i(t)$$



Emulador HP decremental

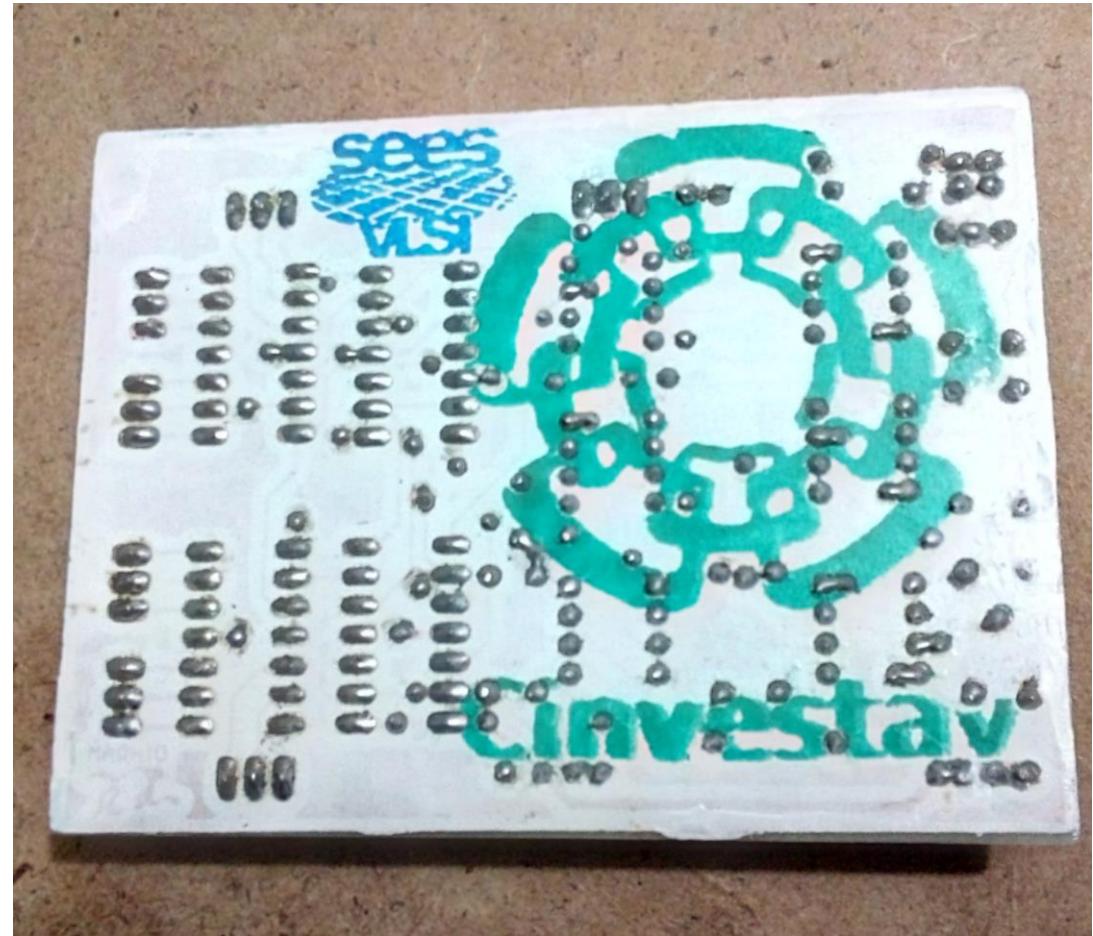
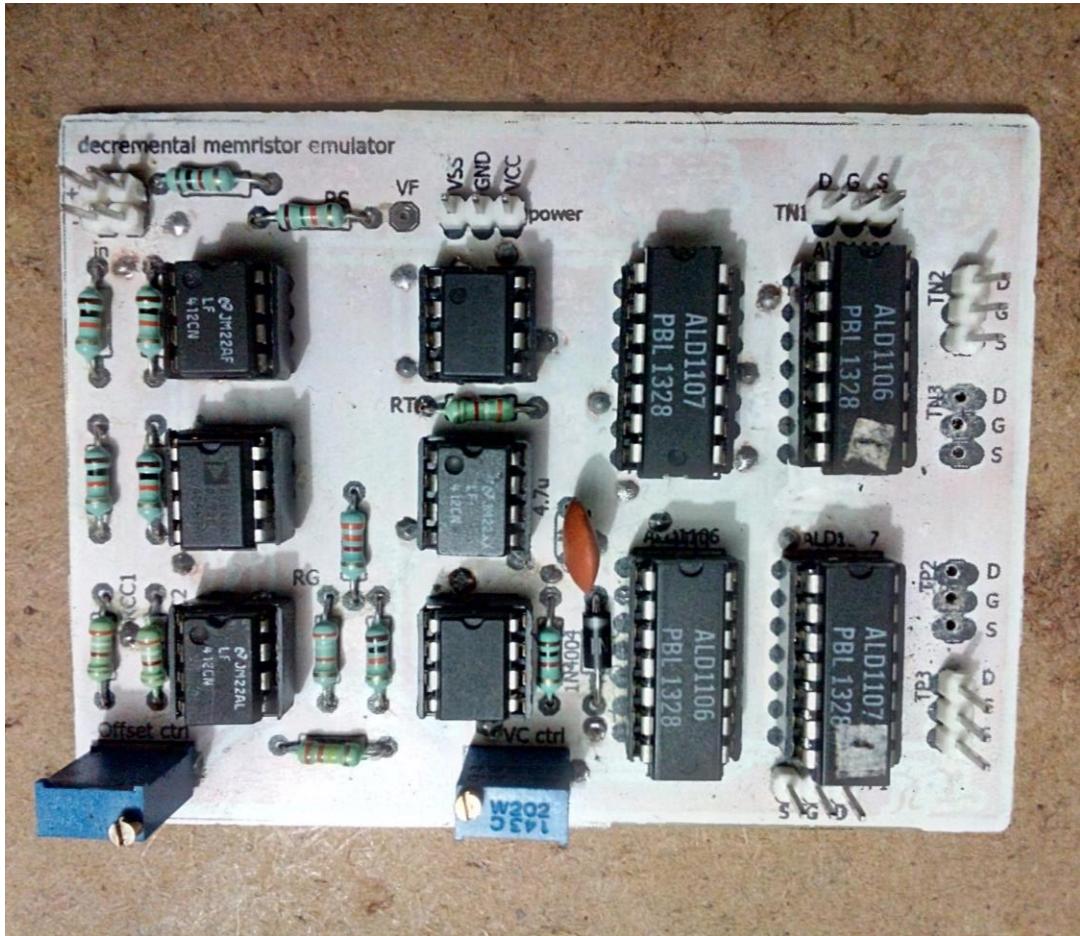


Componentes utilizados

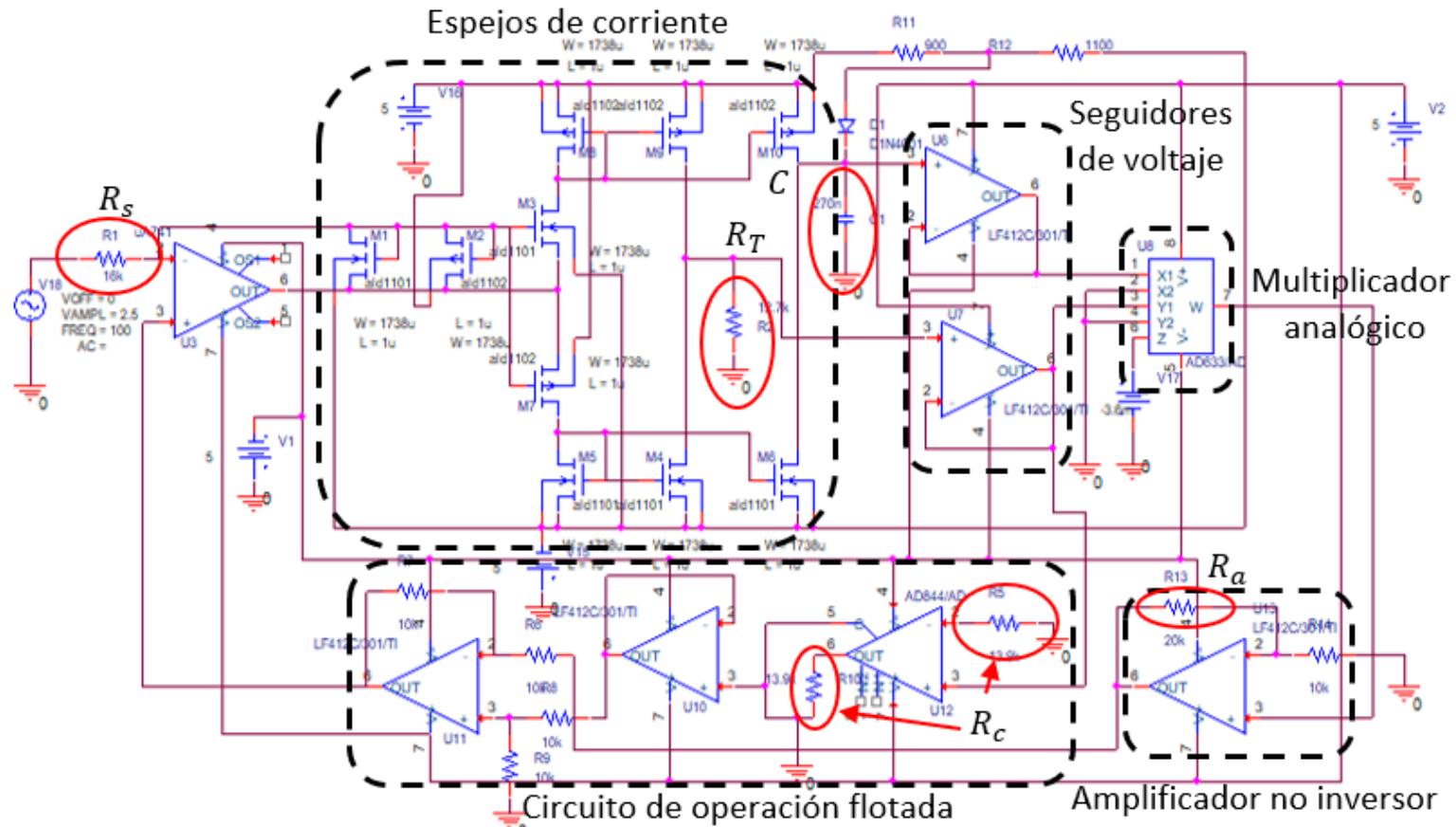
Tabla de componentes	
dispositivo	cantidad
LM741	1
ALD1106	2
ALD1107	2
LF412	3 (5)
AD488	1
AD633	1
R	10
C	1
1N4001	1
POT	2

Tabla de Valores	
dispositivo	valor
R_s	$16k\Omega$
R_t, R_c	$10k\Omega$
R_a	$39k\Omega$
POT	$2k\Omega$
Offset POT	$50k\Omega$
R_{ofs1}	$300k\Omega$
R_{ofs2}	$1k\Omega$
R	$10k\Omega$
C	$220nF$
Vcc. Vss	$+5V, -5V$

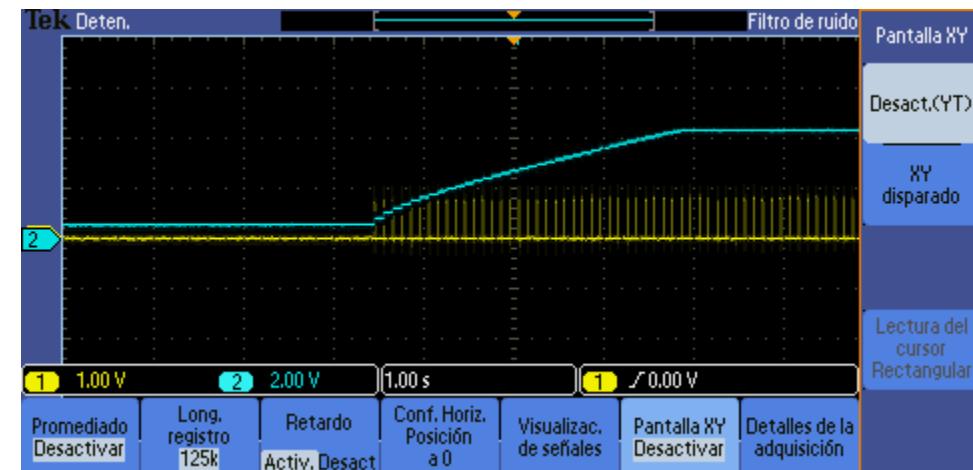
PCB



Emulador HP incremental



$$v_{in}(t) = i_{in}(t)R_s + \alpha R_t v_c i(t)$$

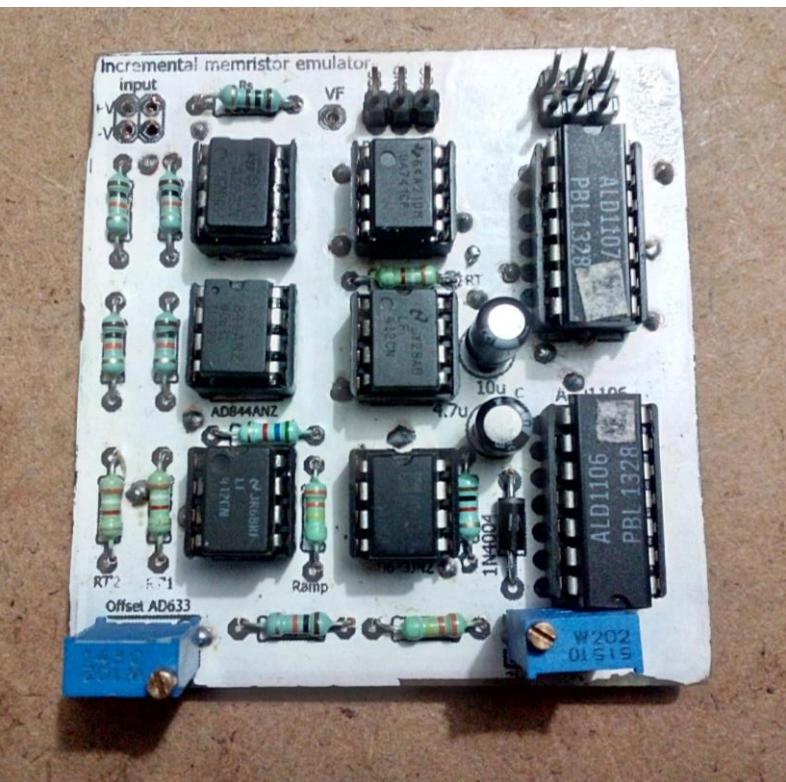


Componentes utilizados

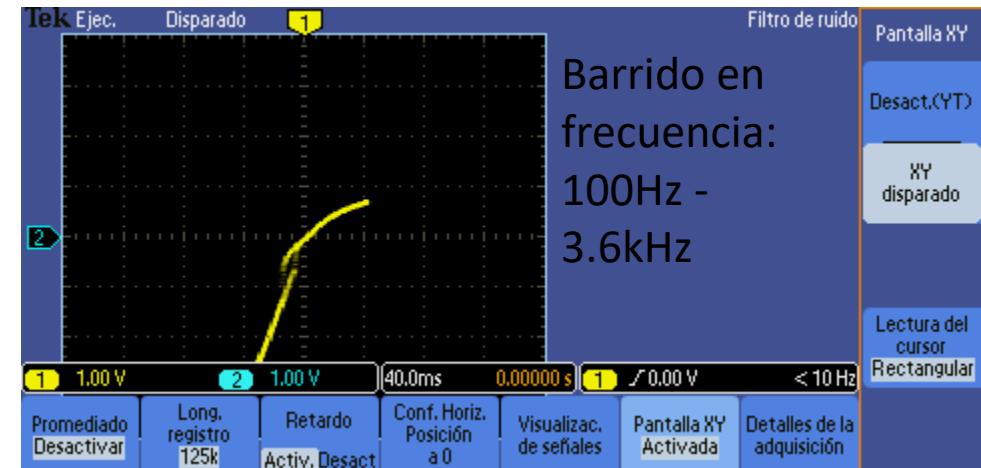
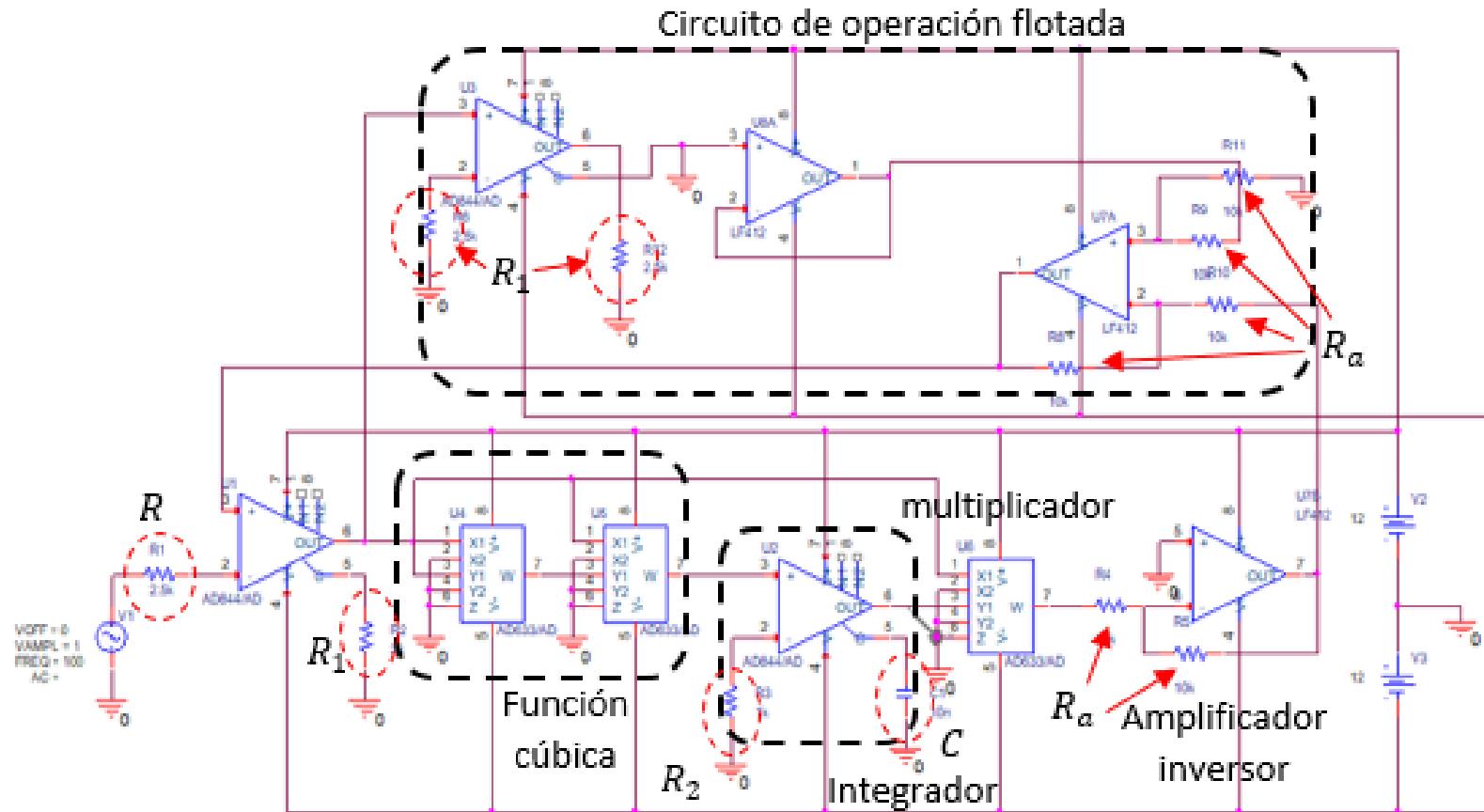
Tabla de componentes	
dispositivo	cantidad
LM741	1
ALD1106	2 (5)
ALD1107	2 (5)
LF412	3 (5)
AD488	1
AD633	1
R	10
C	2
1N4001	1
POT	2

Tabla de valores	
dispositivo	valor
R_s	100Ω
R_t, R_c	$3.9k\Omega$
R_a	$330k\Omega$
POT	$2k\Omega$
R	$10k\Omega$
Offset POT	$50k\Omega$
R_{ofs1}	$300k\Omega$
R_{ofs2}	$1k\Omega$
C	$14.7\mu F$
V_{cc}, V_{ss}	$+5V, -5V$

PCB



Emulador VTEAM



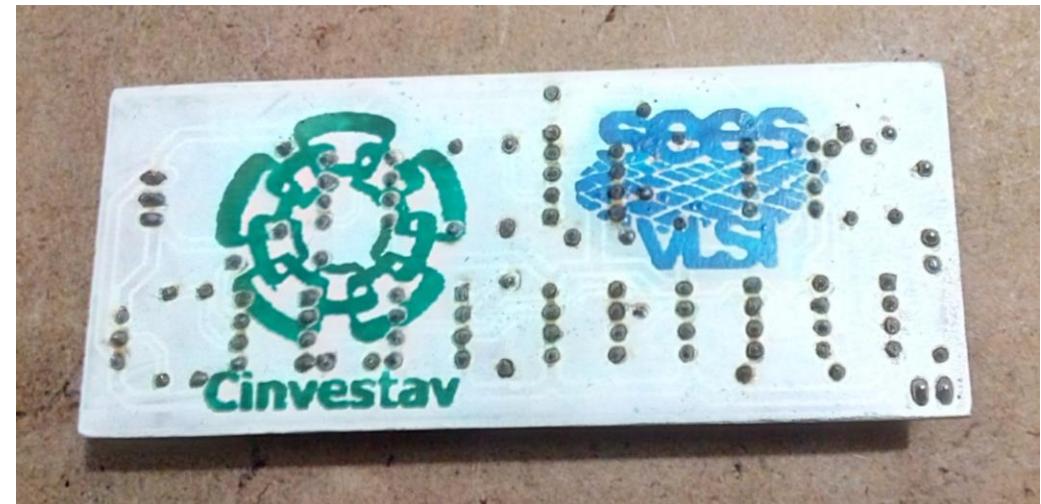
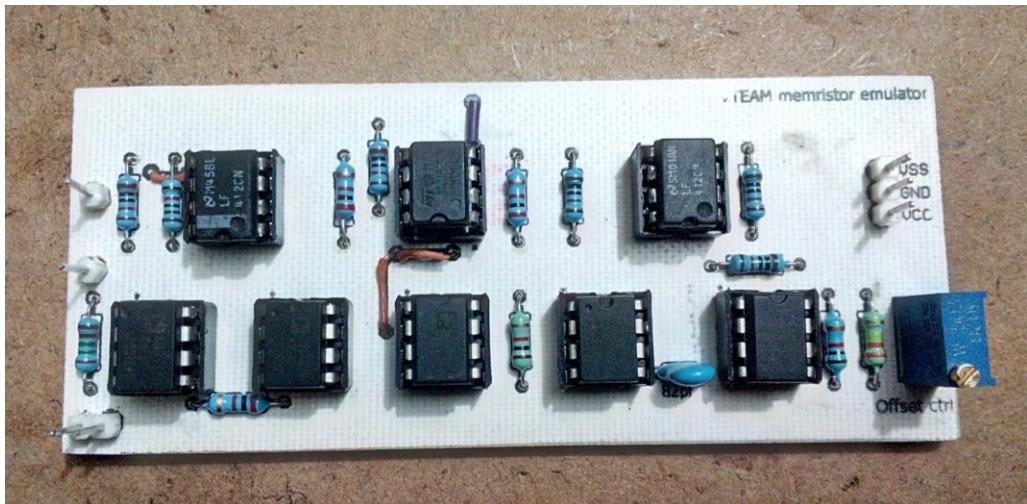
R_{off}	R_{on}
$2.5k\Omega$	833Ω

Componentes utilizados

Tabla de componentes	
dispositivo	valor
R	2.55k
R1	2k
r2	1k
Rc	2.55k
R	10k
C	82pf

Tabla de valores	
dispositivo	cantidad
AD633	3
AD844	3
LF412	2
R	11
C	1

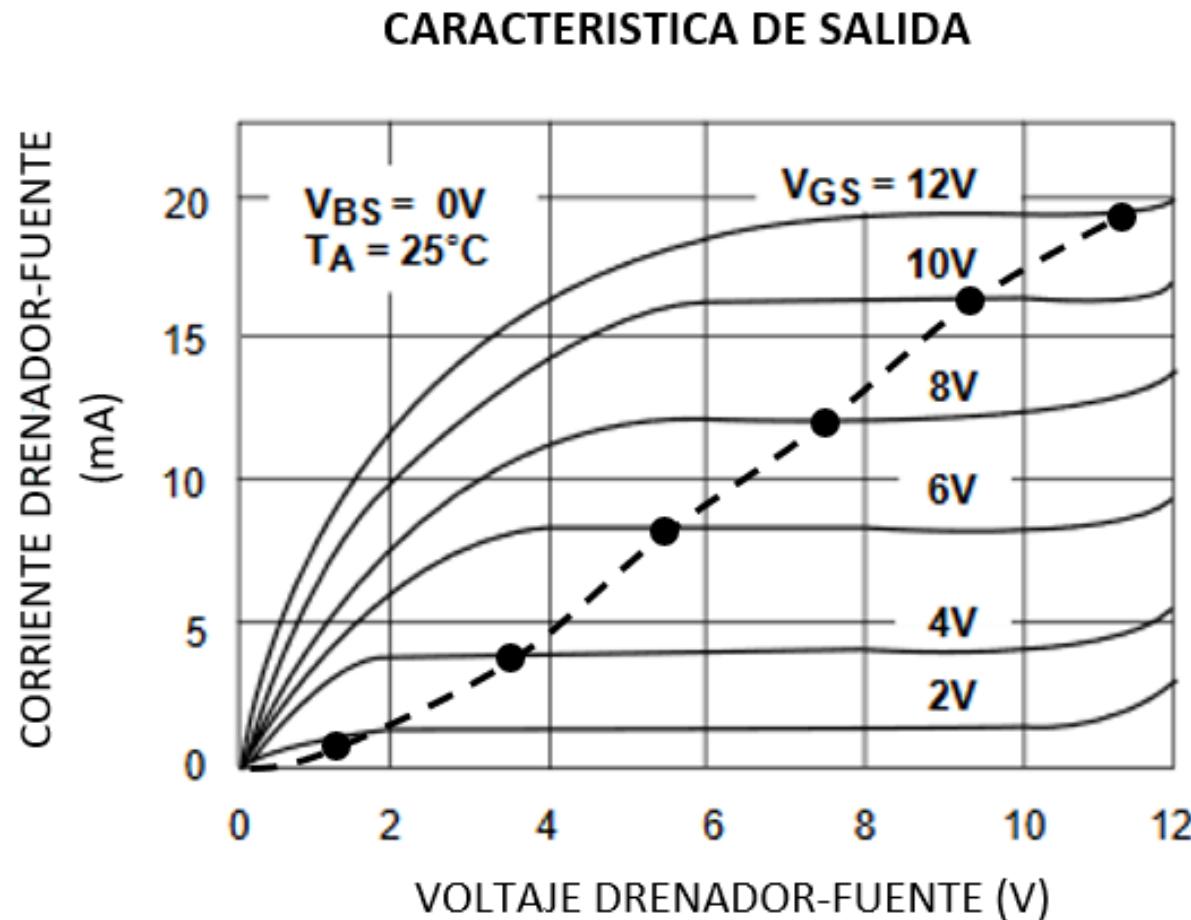
PCB



Contenido

- Motivación
- Objetivos
- Introducción al memristor
 - Características
 - Modelo de HP (arrastre lineal de iones)
 - Modelo VTEAM
- Emuladores
 - Diferencia de potencial
 - MOSFET en la región del triodo (resistencia variable)
- Aplicaciones
 - Oscilador de onda triangular
 - Oscilador caótico

MOSFET como resistencia variable

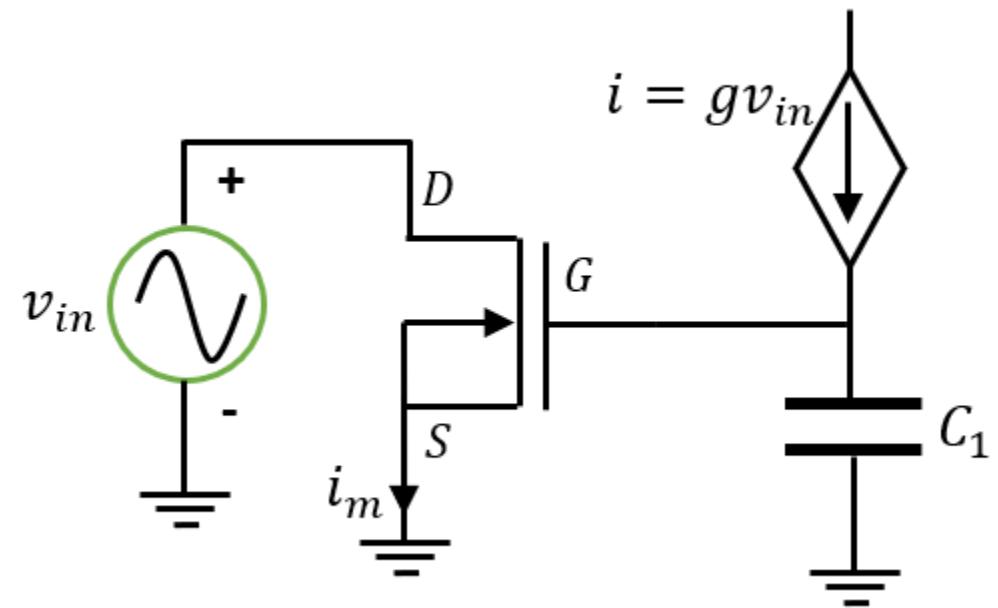
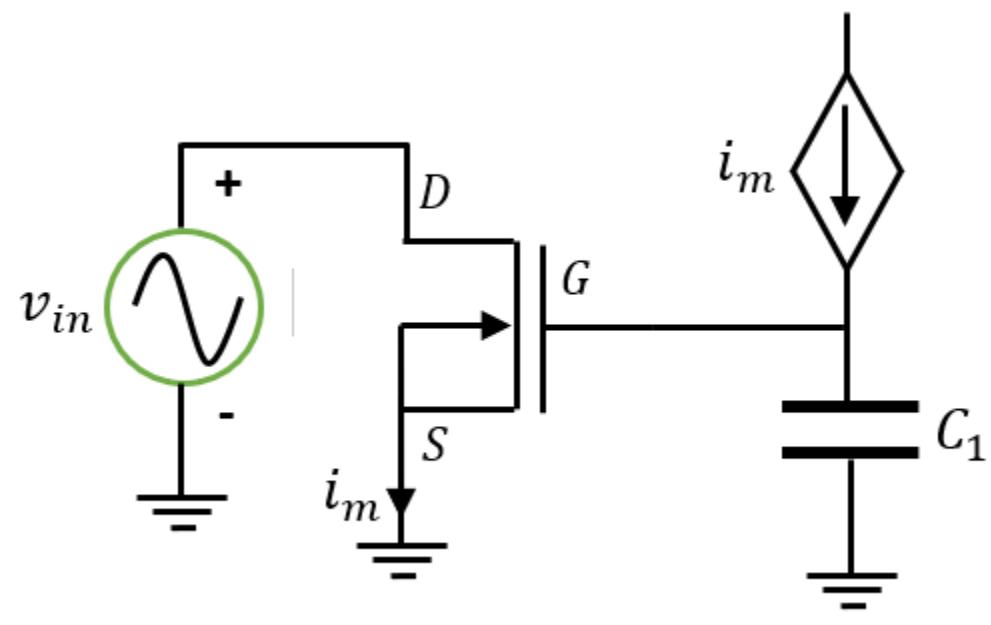


$$V_{GS} \geq V_{THN}, \quad V_{DS} \leq V_{DSSat} (= V_{GS} - V_{THN})$$

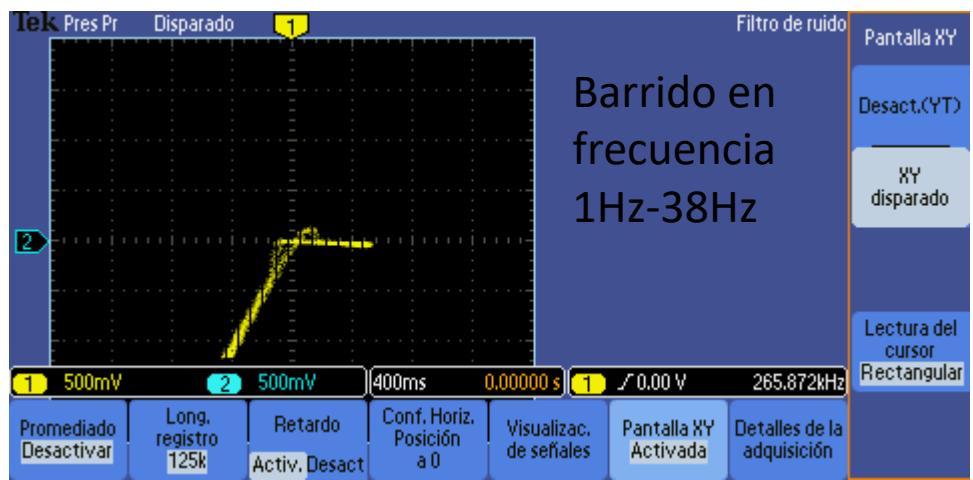
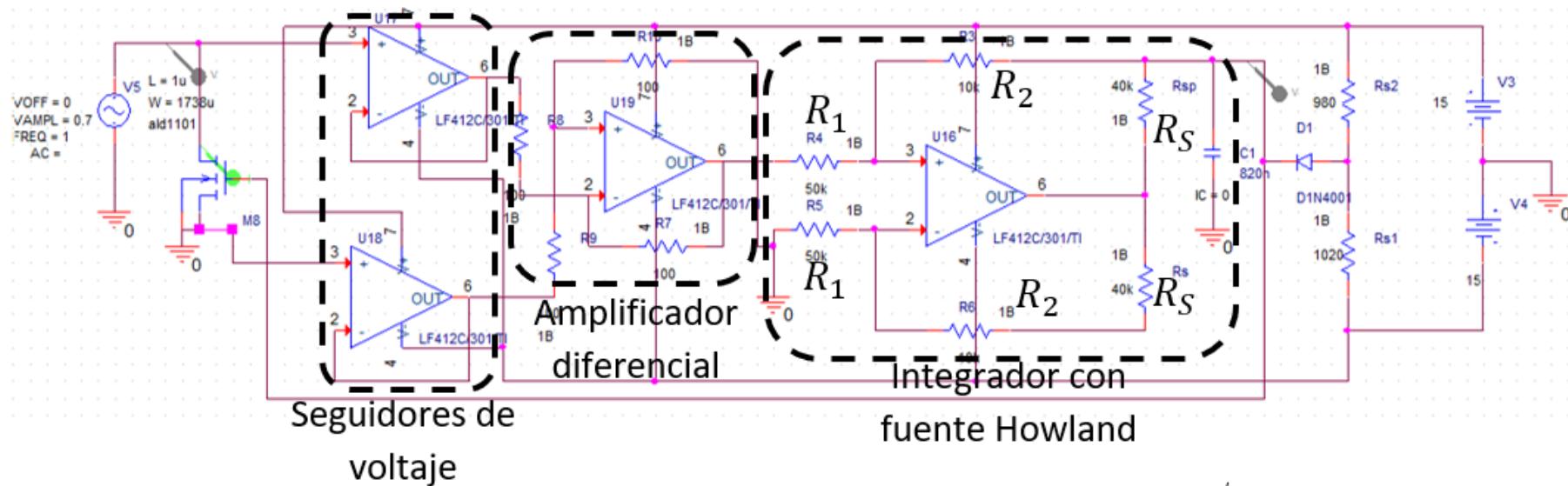
$$R_{ch} = \frac{1}{KP_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{THN} - V_{DS})}$$

$$KP_n = \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

Esquemas



MOSFET-Howland



R_{off}	R_{on}
$> 2M\Omega$	525Ω

$$i_C = C \frac{dV_C}{dt}$$

$$i_{Load} = \frac{V_{in}}{R_s} \left(\frac{R_2 + R_s}{R_1} \right)$$

$$V_C = \frac{1}{R_s C} \left(\frac{R_2 + R_s}{R_1} \right) \int V_{in} dt$$

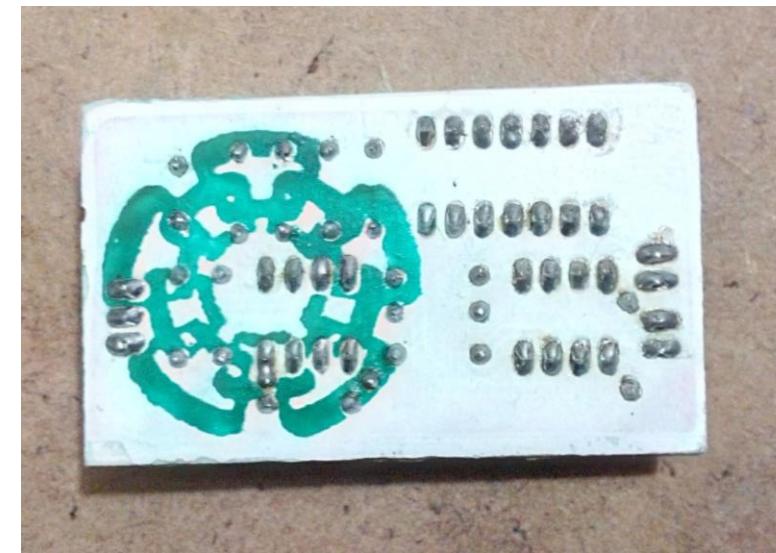
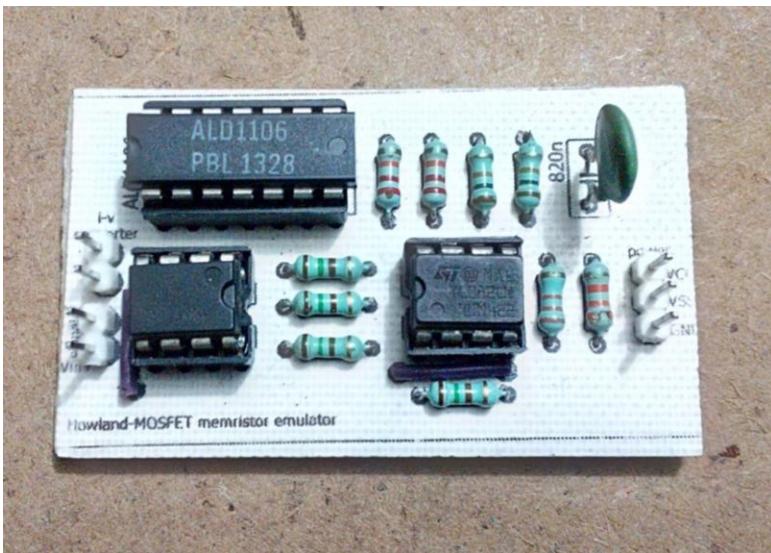
$$V_C = \frac{\varphi}{R_s C} \left(\frac{R_2 + R_s}{R_1} \right)$$

Componentes utilizados

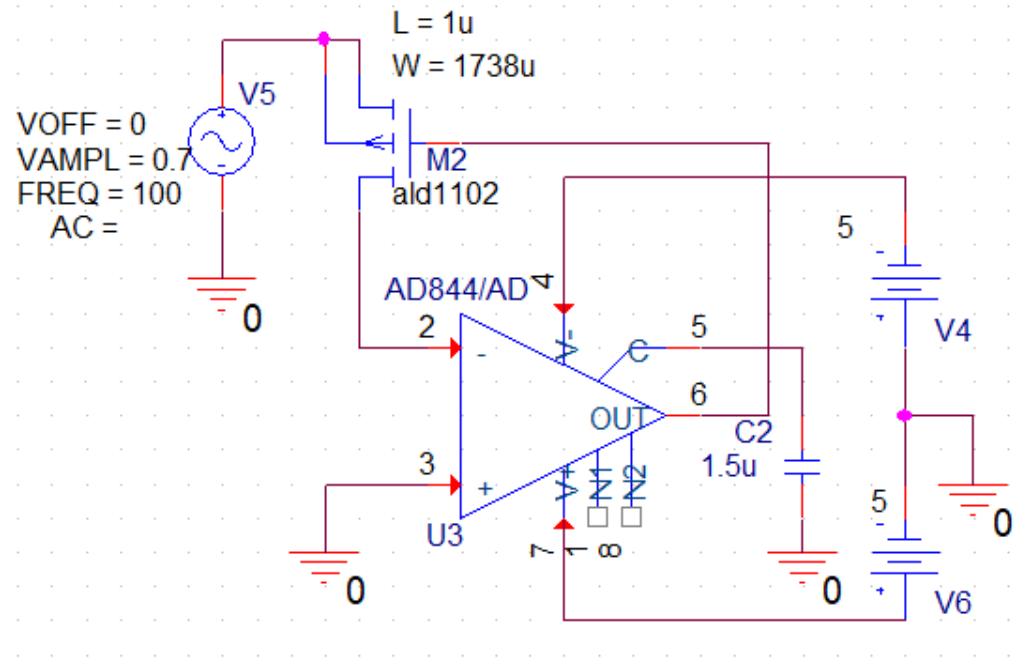
Tabla de componentes	
dispositivo	cantidad
ALD1106	1
LF412	2
C	1
R	10

Tabla de valores	
dispositivo	valor
Rdif	100
Ra	33K
Rb	10k
Rc	22k
C	82nF

PCB

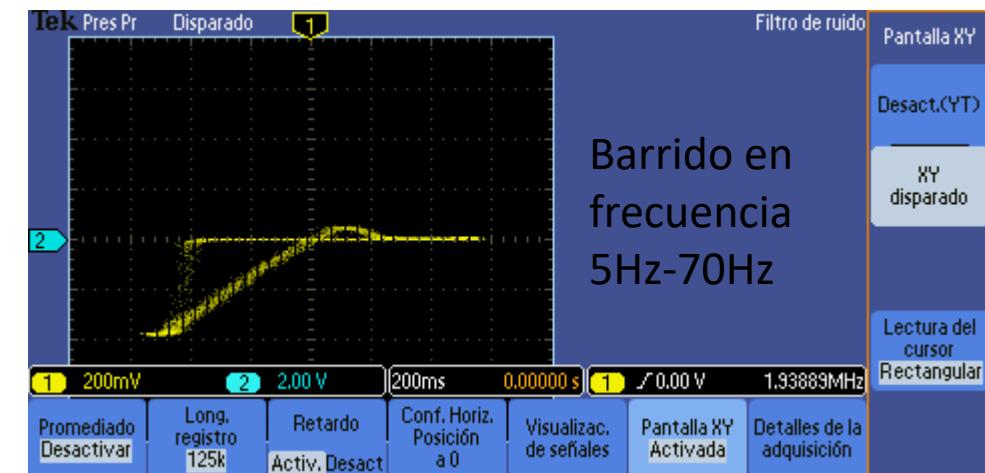
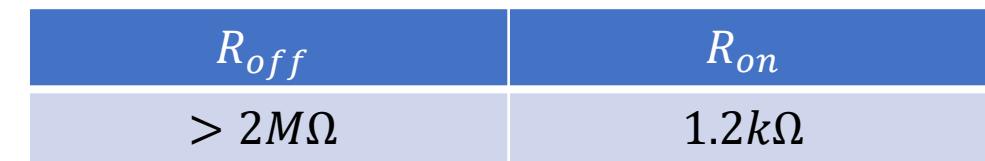
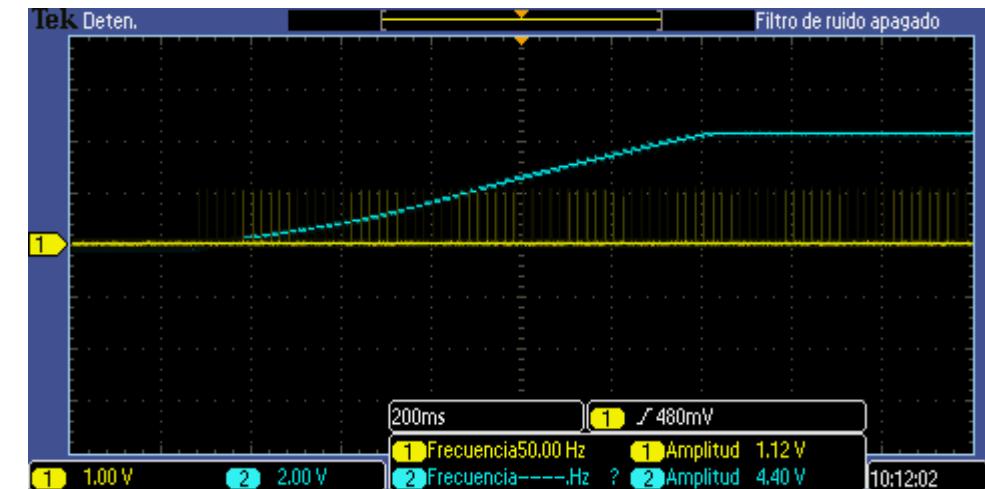


MOSFET-CCII



$$i_C = i_m$$

$$V_C = \frac{1}{C} \int i_m dt$$

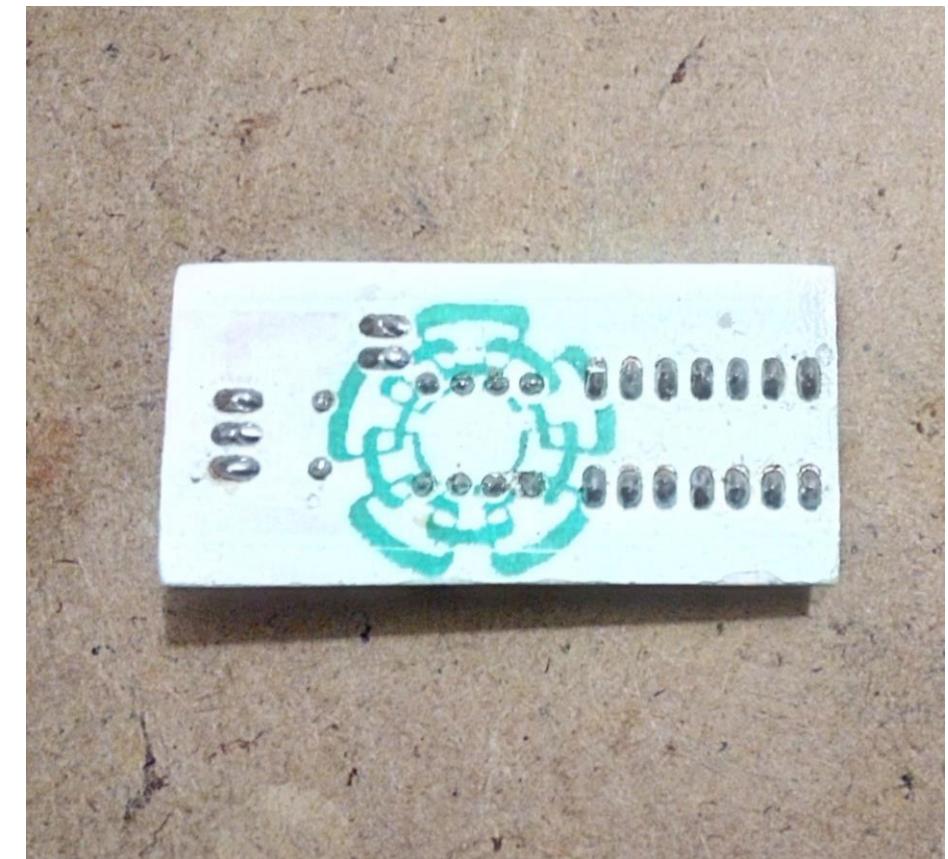
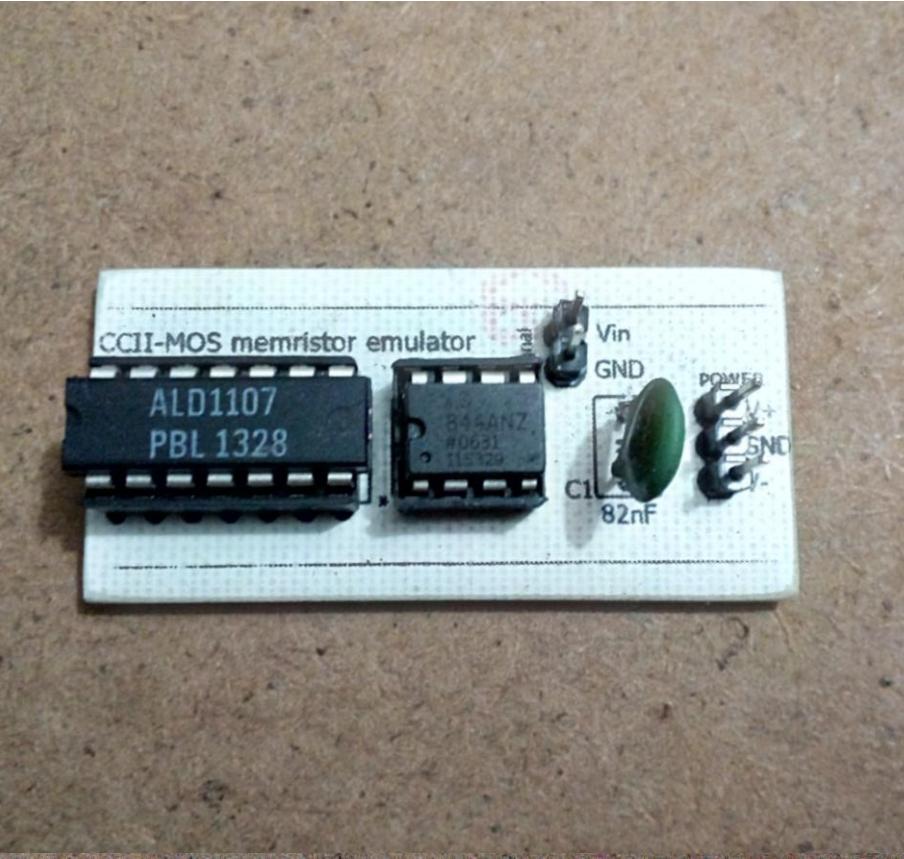


Componentes utilizados

Tabla de componentes	
Dispositivo	Cantidad
ALD1107	1
AD844	1
C	1

Tabla de valores	
dispositivo	valor
C	680nF

PCB



Contenido

- Motivación
- Objetivos
- Introducción al memristor
 - Características
 - Modelo de HP (arrastre lineal de iones)
 - Modelo VTEAM
- Emuladores
 - Diferencia de potencial
 - MOSFET en la región del triodo (resistencia variable)
- Aplicaciones
 - Oscilador de onda triangular
 - Oscilador caótico

Oscilador de onda triangular

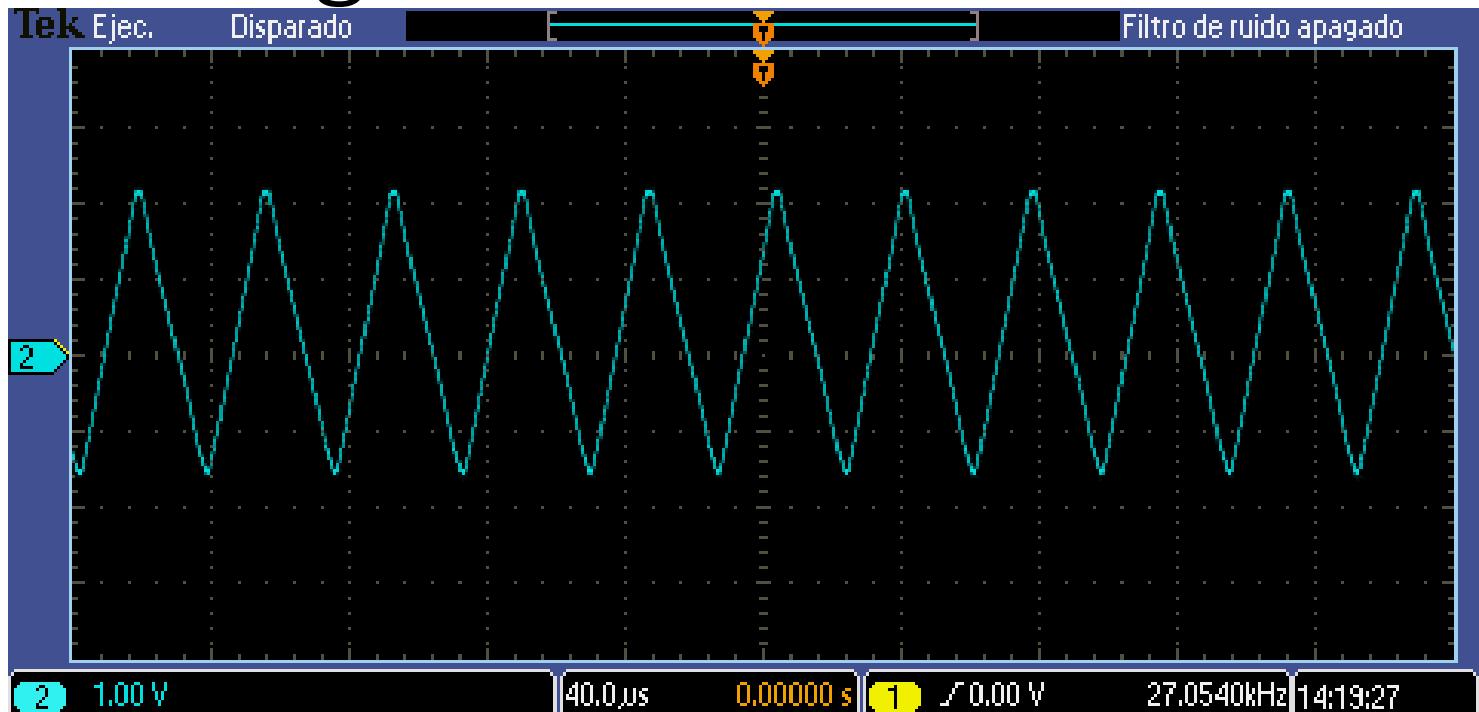
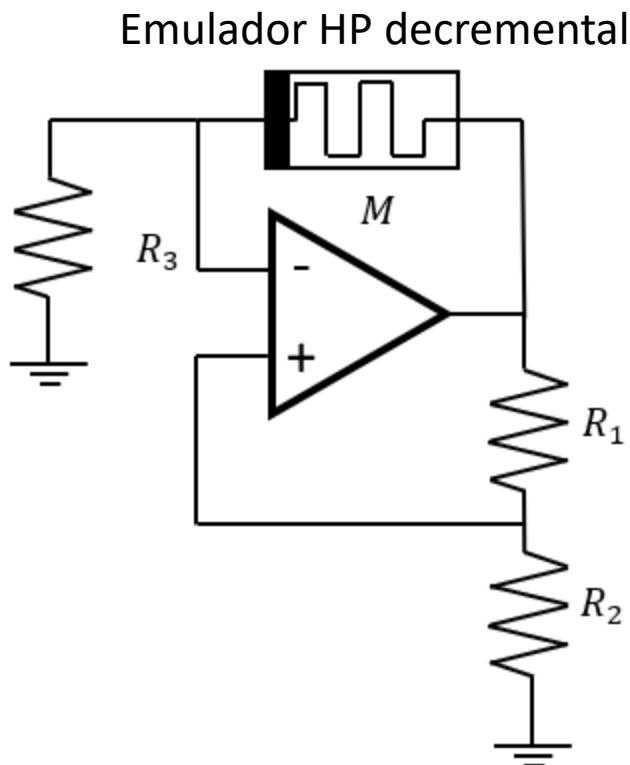


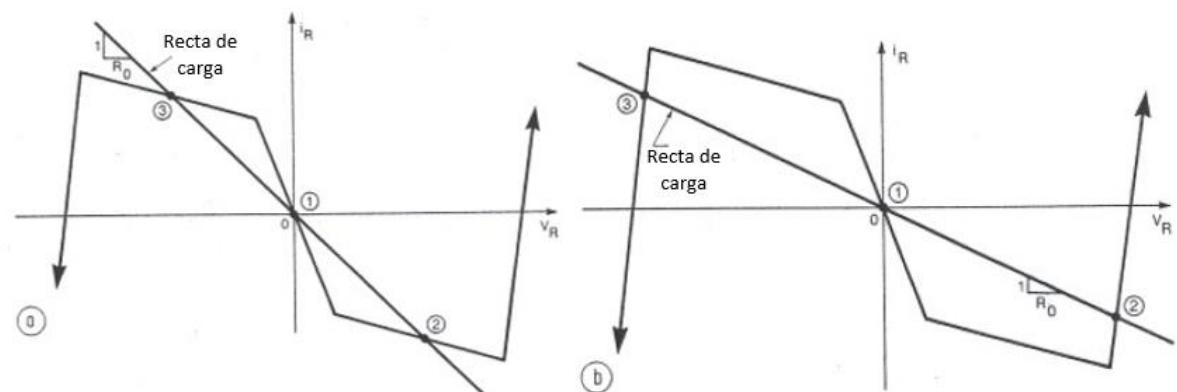
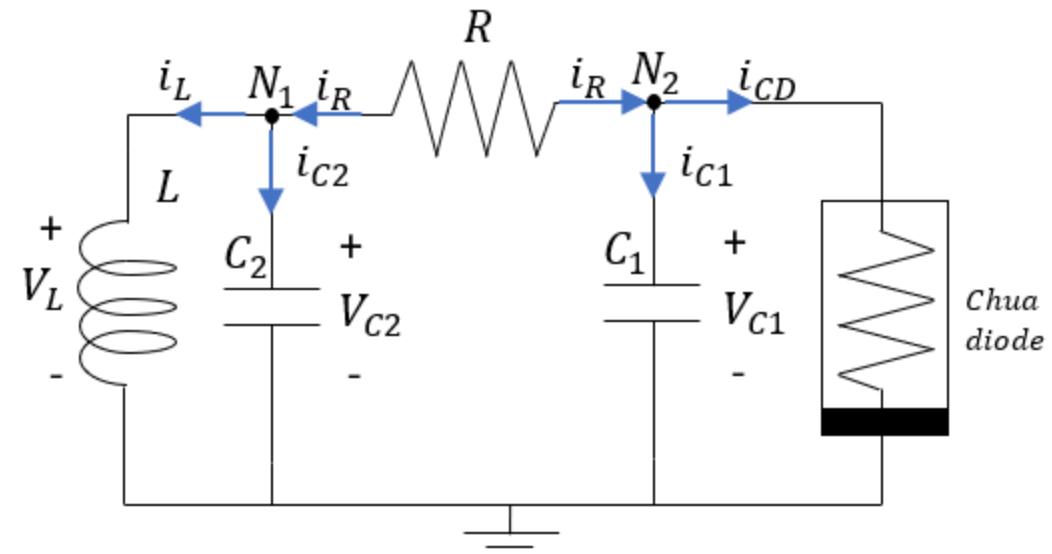
Tabla de valores

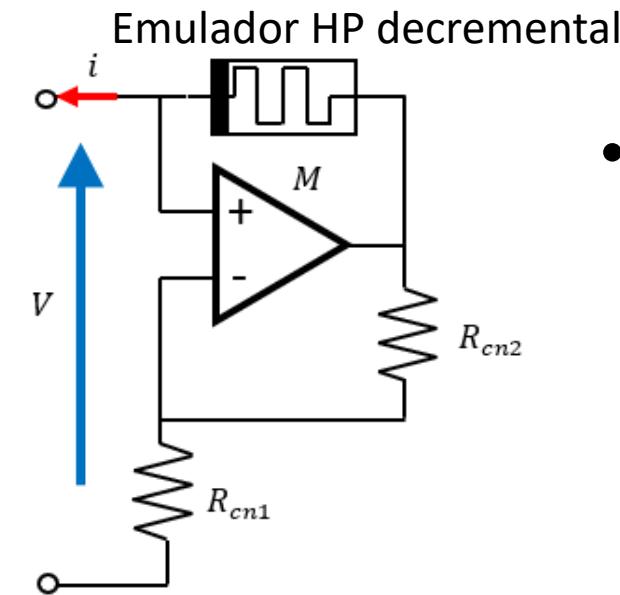
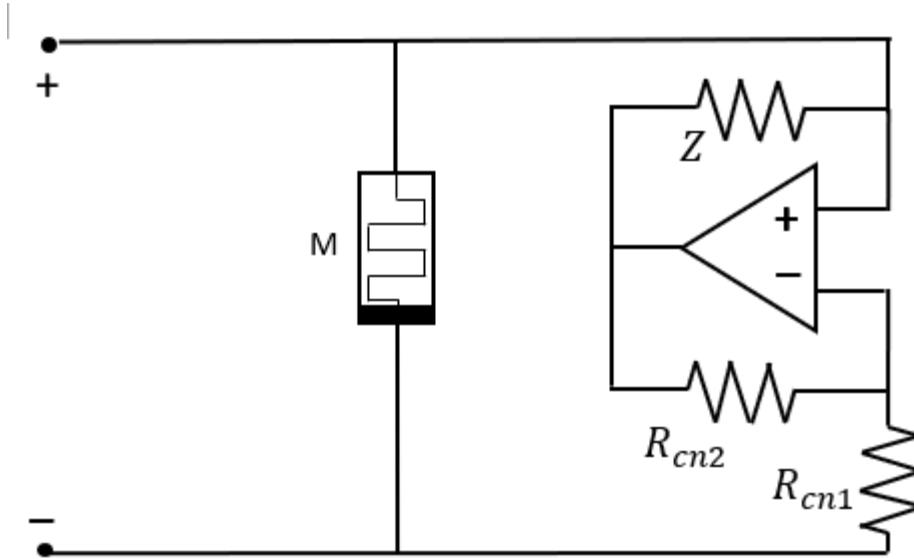
Componente	Valor
R1	10K
R2	10K
R3	12.8K
Memristor	HP decremental

Oscilador caótico

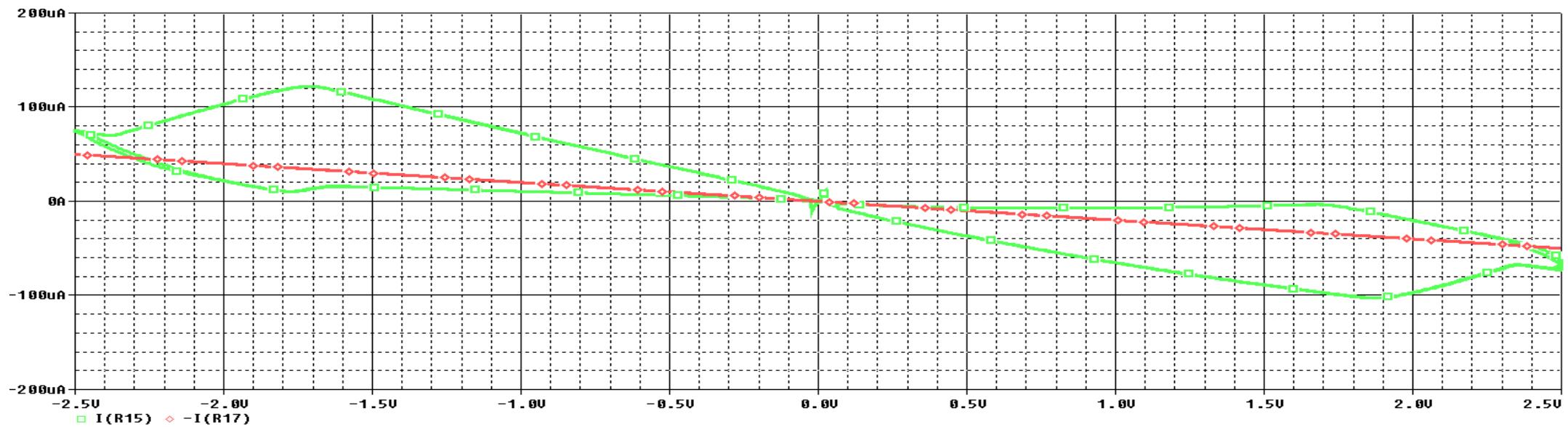
Condiciones necesarias

- El circuito debe contener dos o tres puntos de equilibrio inestables.
- El circuito requiere por lo menos tres elementos de circuito lineales pasivos con capacidad de almacenamiento de energía, como son los inductores y los capacitores.
- El circuito debe contener un resistor no lineal controlado por voltaje, que sea caracterizado por una curva v-i lineal por tramos con pendiente negativa. Para que sea realizable, éste debe ser eventualmente pasivo

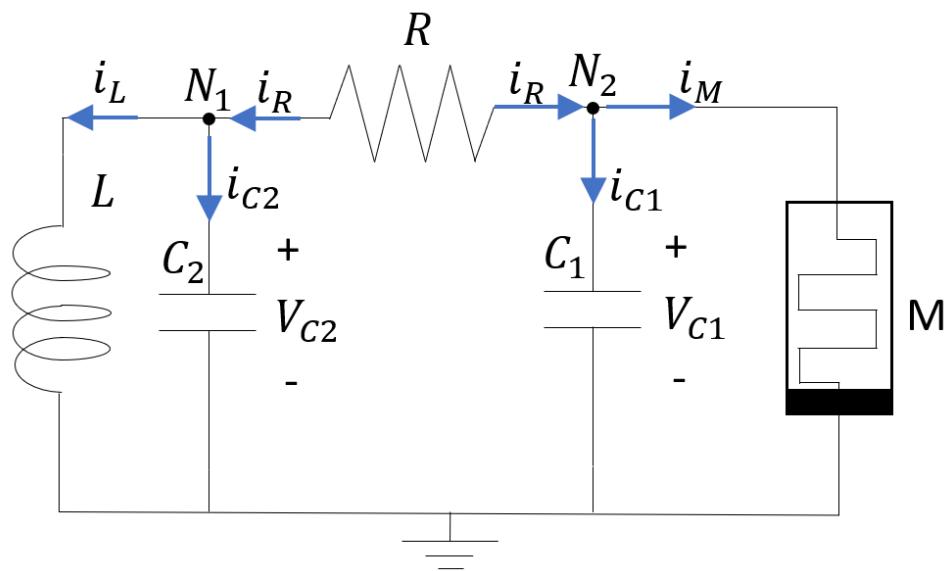




$$\bullet Z_{in} = -Z \frac{R_{cn1}}{R_{cn2}}$$



$$\begin{aligned}
 i_{C1} &= i_R - i_M \\
 i_{C2} &= i_R - i_L \\
 v_L &= \frac{v_{C2}}{v_{N2}} \\
 i_C &= \frac{(Rs + aRtv_C)}{(Rs + aRtv_C)}
 \end{aligned}$$



- $x_1 = v_{C1}; \quad x_2 = v_{C2}; \quad x_3 = i_L; \quad x_4 = v_C$

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{C1} \left(\frac{x_2 - x_1}{R} + \frac{x_1}{Rs + aRtx_4} \right)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C2} \left(\frac{x_1 - x_2}{R} - x_3 \right)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{x_2}{L}$$

$$\dot{x}_4 = \frac{x_1}{C(Rs + aRtx_4)}$$

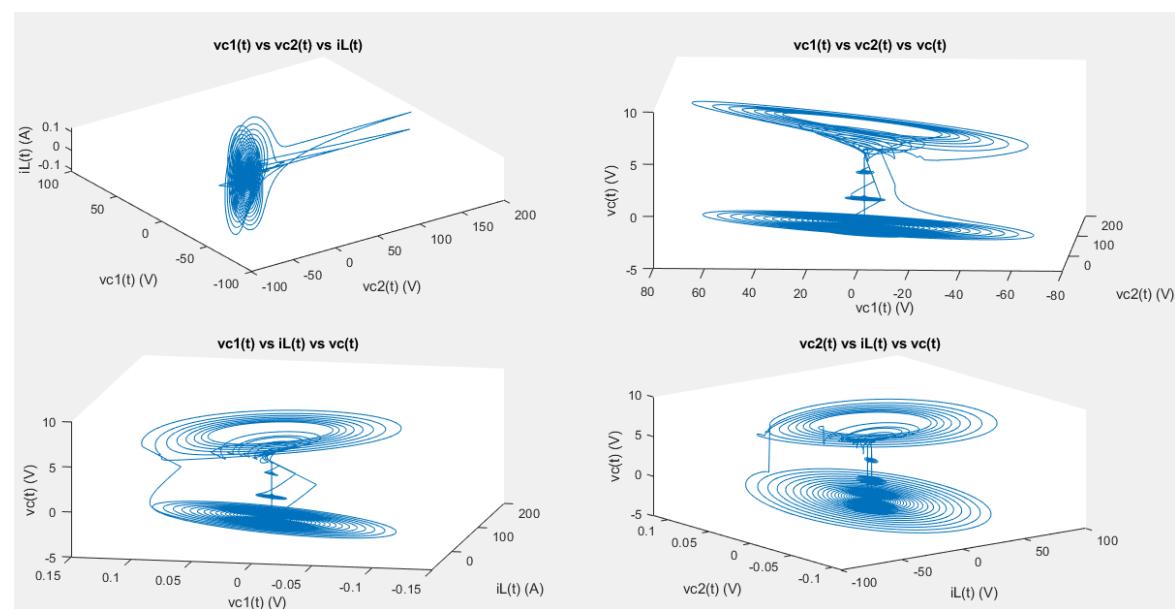
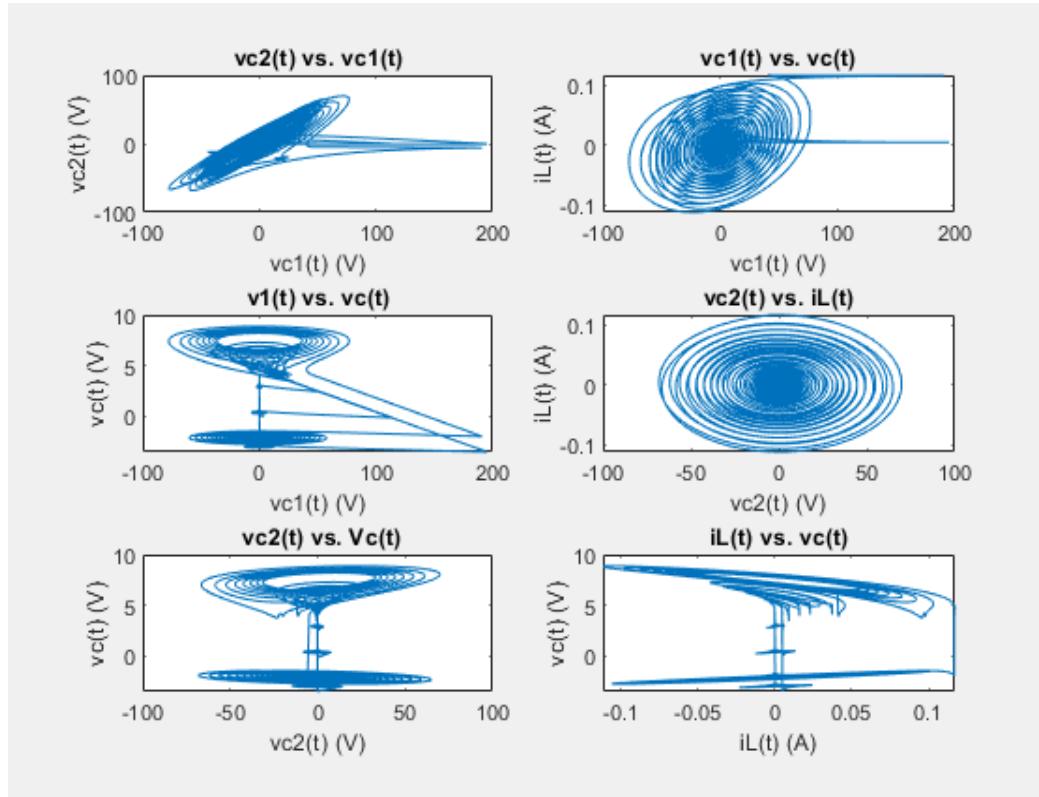
- $Pc = \det(\lambda I - Jb(P0))$

$$Jb = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \left(\frac{1}{R_s + aR_t x_4} - \frac{1}{R} \right) & \frac{1}{RC_1} & 0 & \frac{aR_t x_1}{C_1(R_s + aR_t x_4)^2} \\ \frac{1}{RC_2} & -\frac{1}{RC_1} & -\frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1(R_s + aR_t x_4)} & 0 & 0 & \frac{aR_t x_1}{C(R_s + aR_t x_4)^2} \end{bmatrix} \xrightarrow{\begin{bmatrix} P0 \\ 0 & 0 & X_4 \end{bmatrix}} \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \left(\frac{1}{R_s + aR_t X_4} - \frac{1}{R} \right) & \frac{1}{RC_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{RC_2} & -\frac{1}{RC_1} & -\frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_1(R_s + aR_t X_4)} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

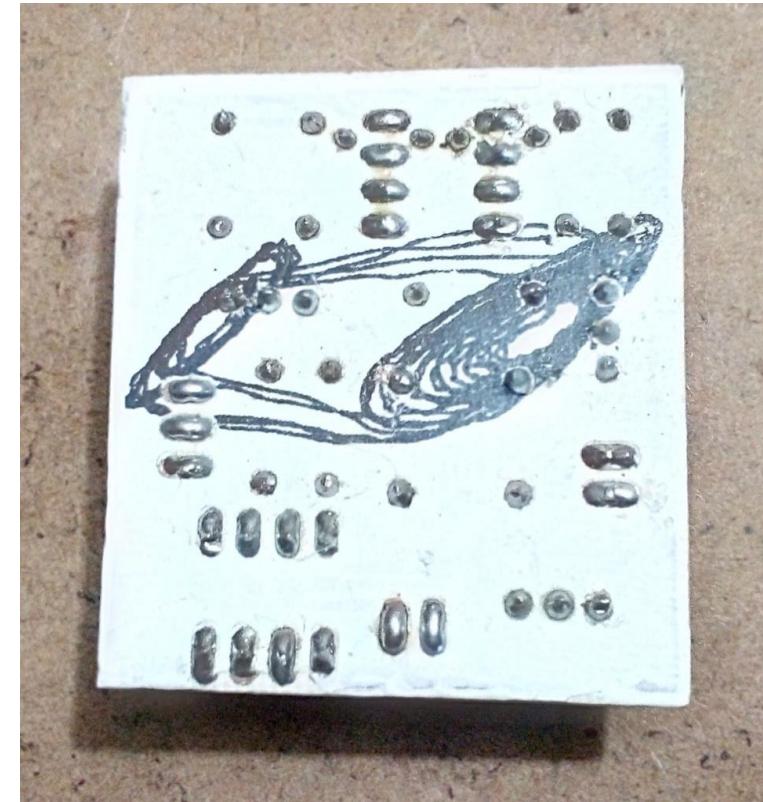
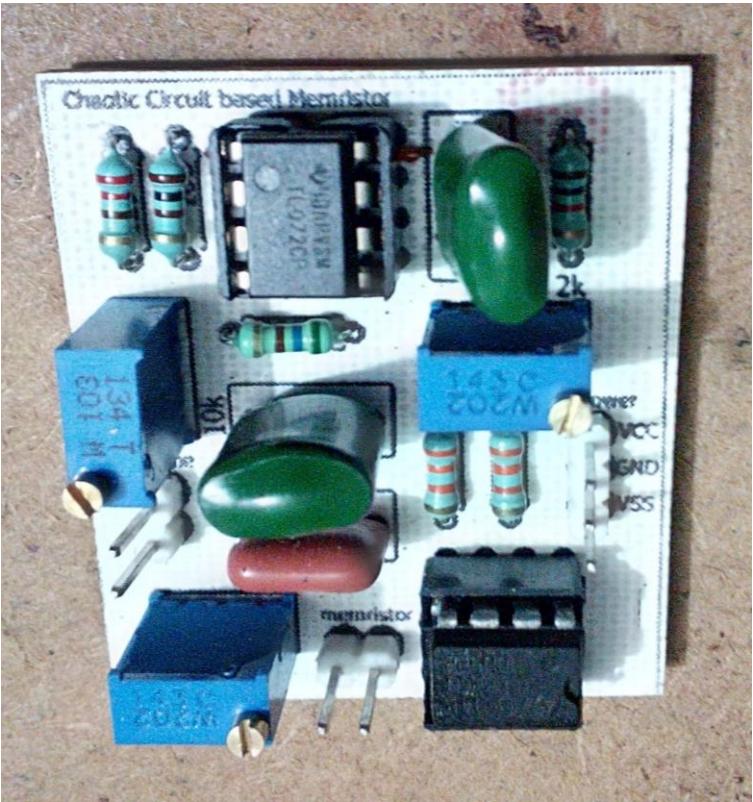
$$\lambda \left(\lambda^3 + \left(\frac{1}{RC_1} + \frac{1}{RC_2} - \frac{1}{R_s - av_C R_t} \right) \lambda^2 + \left(\frac{1}{LC_2} - \frac{1}{RC_1 C_2 (R_s - av_C R_t)} \right) \lambda + \left(\frac{R + av_C R_t - R_s}{R(R_s - av_C R_t)} \right) \right) = 0$$

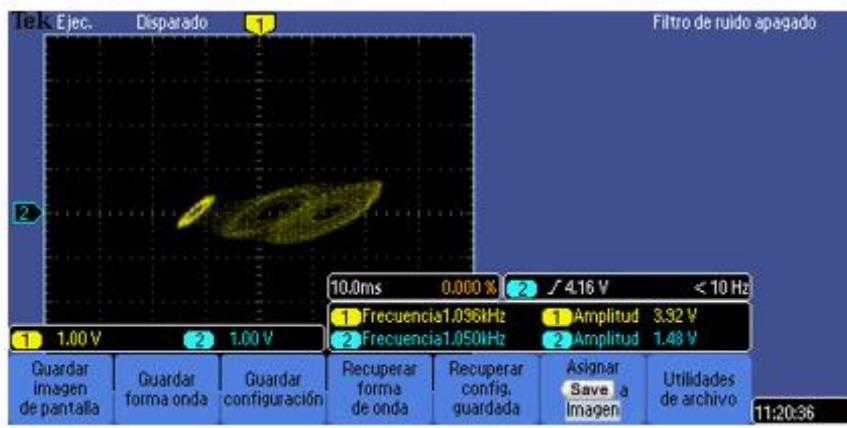
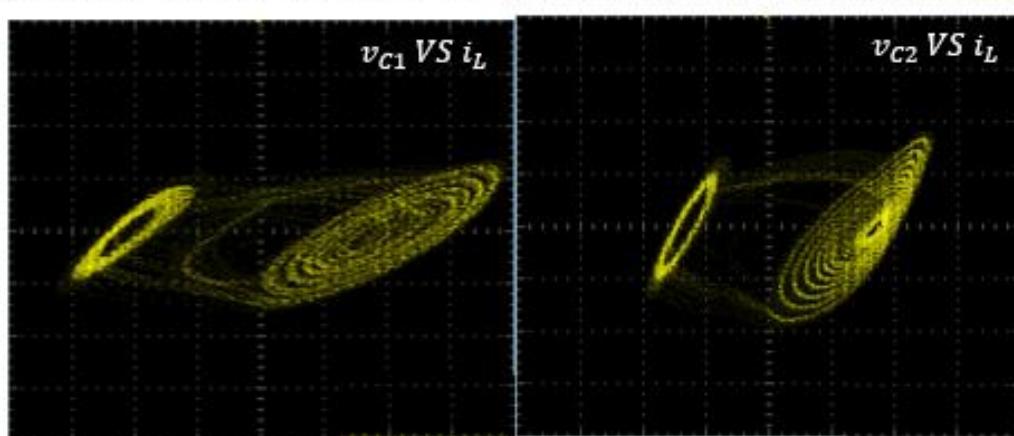
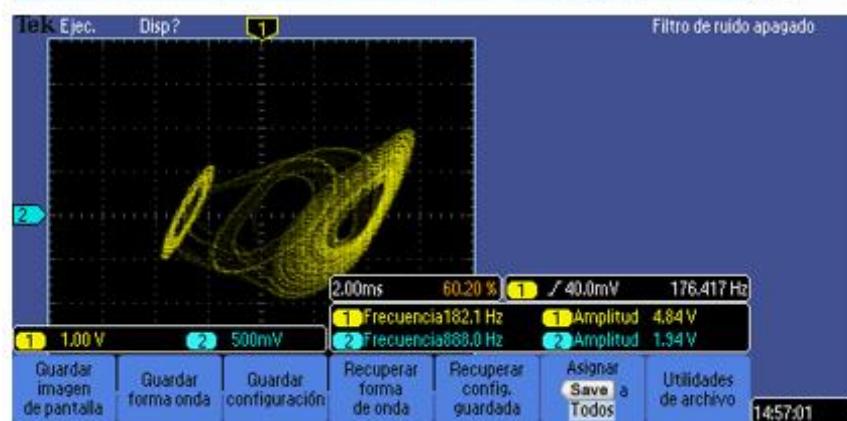
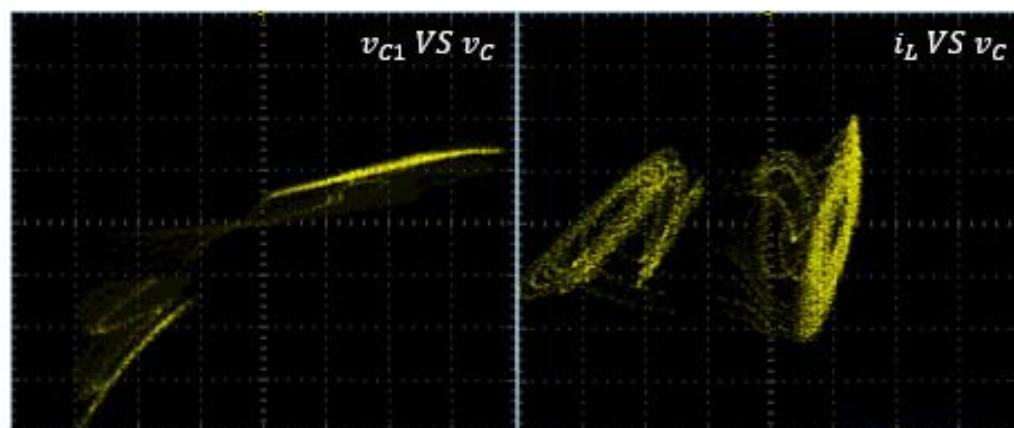
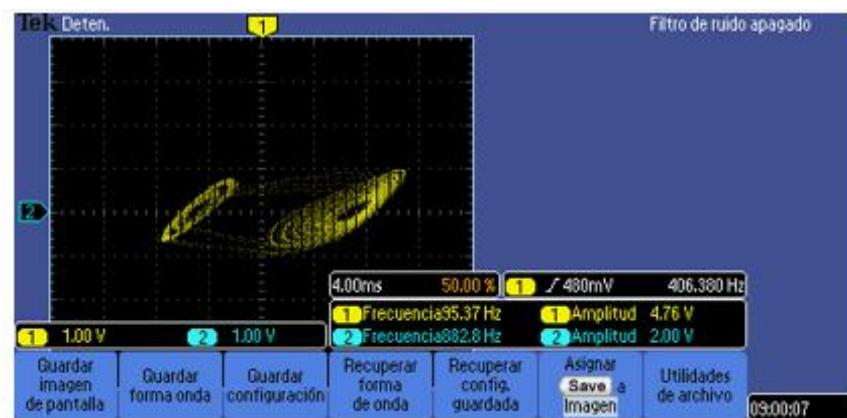
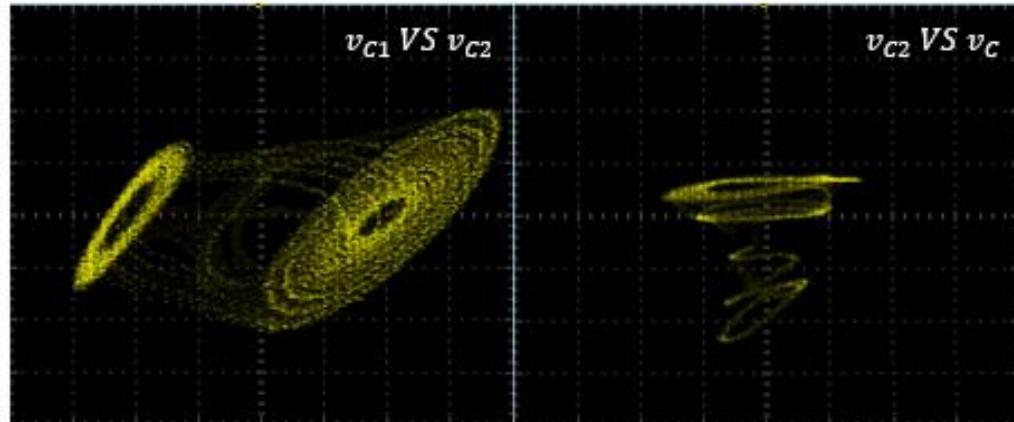
	$C1 = 10nF$	$C2 = 100nF$	$L = 42.28mH$	$R = 2.098k$
$v_c < 3.57V$	Una raíz negativa y dos complejas conjugadas			
$3.57V < v_c < 4.11V,$	Una raíz real positiva y dos complejas conjugadas			

Simulación



PCB





Conclusiones

- Fue posible emular el comportamiento memristivo por medio de circuitos empleando elementos discretos.
- El uso de elementos discretos permite ajustar las características del memristivas del emulador, lo que es de gran ayuda en el desarrollo de aplicaciones.
- Dependiendo del modelo que se desee emular y la técnica de emulación, será la complejidad del circuito emulador.
- El comportamiento memristivo conseguido con los emuladores es bastante bueno, lo que se comprobó con las aplicaciones desarrolladas

Trabajo futuro

- Puede mejorarse algunas de las características de los emuladores, en especial la capacidad de memoria no volátil, empleando CCDs o transistores de compuerta flotante.
- Una vez mejorada la característica de memoria no volátil pueden desarrollarse aplicaciones de memoria.
- Debido a simplicidad del emulador MOSFET-CCII se recomienda emplearlo en aplicaciones que requieran varios memristores, como en redes neuronales simples.
- Pueden desarrollarse aplicaciones como circuitos analógicos programables, o controladores PID.

Referencias

- [1] B Strukov, Dmitri & S Snider, Gregory & Stewart, Duncan & Williams, Stan. (2008). The Missing Memristor Found. *Nature*. 453. 80-3. 10.1038/nature06932.
- [2] Kim, Hyongsuk & Pd. Sah, Maheshwar & Yang, Changju & Cho, Seongik & Chua, Leon. (2012). Memristor Emulator for Memristor Circuit Applications. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*. 59.
- [3] Kvatinsky, Shahar & Ramadan, Misbah & Friedman, E.G. & Kolodny, Avinoam. (2015). VTEAM: A General Model for Voltage-Controlled Memristors. *Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions on*. 62. 786-790. 10.1109/TCSII.2015.2433536. 2422-2431. 10.1109/TCSI.2012.2188957.
- [4] Kvatinsky, Shahar & Friedman, E.G. & Kolodny, Avinoam & C. Weiser, U. (2013). TEAM: ThrEshold adaptive memristor model. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*. 60. 211-221. 10.1109/TCSI.2012.2215714.
- [5] Kim, Hyongsuk & Pd. Sah, Maheshwar & Yang, Changju & Cho, Seongik & Chua, Leon. (2012). Memristor Emulator for Memristor Circuit Applications. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*. 59. 2422-2431. 10.1109/TCSI.2012.2188957.
- [6] Saxena, Vishal. (2017). A Compact CMOS Memristor Emulator Circuit and its Applications.

- [7]Kyriakides, Evripides & Georgiou, Julius. (2014). A compact, low-frequency, memristor-based oscillator. *zInternational Journal of Circuit Theory an applications*. 43. 10.1002/cta.2030.
- [8]Chua, Leon. (1992). The Genesis of Chua's Circuit. *AEU. Archiv fur Elektronik und Ubertragungstechnik*. 46.
- [9]Kilic, Recai. (2010). *A Practical Guide for Studying Chua's Circuits*.
- [10]<https://www.aldinc.com/pdf/ALD1107.pdf>
- [11]<https://www.aldinc.com/pdf/ALD1106.pdf>
- [12]<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf412-n.pdf>
- [13]<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD633.pdf>