

SÍNTESIS ELECTRÓNICA DE UNA CÉLULA B EMPLEANDO OPAMPS

V. Fernández Carreón

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica
viry_fc@hotmail.es

J. M. Munoz Pacheco

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica
viry_fc@hotmail.es

O. G. Félix Beltrán

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica
viry_fc@hotmail.es

E. Zambrano Serrano

Departamento de Matemáticas Aplicadas IPICYT
viry_fc@hotmail.es

Resumen

En este trabajo se presenta la implementación electrónica que describe el comportamiento de la célula β pancreática según el modelo matemático propuesto por Pernarowsky. Este modelo permite conocer el comportamiento de una sola célula estando en fase activa e inactiva y presentando los distintos tipos de oscilaciones que se generan en la membrana celular conocidas como Bursting Electrical Activity (BEA). A partir de este modelo matemático se plantea su implementación electrónica utilizando amplificadores operacionales de voltaje (OpAmps) y multiplicadores analógicos. Utilizando un número de componentes electrónicos reducido debido a configuraciones diferenciales de OpAmps, el diseño propuesto es capaz de emular el comportamiento dinámico de la célula β .

Las simulaciones realizadas con el software SPICE concuerdan con el modelo teórico validando el diseño.

Palabra(s) Clave(s): Bursting, célula beta, Pernarowsky, OpAmp.

1. Introducción

El páncreas es una glándula mixta que contiene un tejido exocrino y un tejido endocrino, este último está compuesto por miles de conjuntos de células, agrupadas en conjuntos conocidos como islotes de Langerhans [1, 2]. Entre las células que componen los estos islotes se encuentran las células β en un 70%, cuya función es la de producir y segregar insulina en el torrente sanguíneo cuando los niveles de glucosa aumentan con el objetivo de estimular al hígado a absorberla y así, regular los niveles de azúcar en la sangre [2, 3]. Las células β se encuentran rodeadas por una membrana, que cuando se sincronizan las células, genera un potencial eléctrico con oscilaciones complejas. Estas se dividen en dos tipos de comportamiento; el primero se caracteriza por tener una fase activa con una escala de tiempo rápida, y el otro por tener una fase pasiva o silenciosa con una escala de tiempo lenta [3, 4]. A la suma de ambos comportamientos se le conoce como bursting cuadrado, el cual da origen al Bursting Electrical Activity (BEA), actividad encargada de la función normal y sana del páncreas [3, 4]. En caso contrario, uno de los padecimientos más comunes a nivel mundial que podría desarrollarse es la aparición de la diabetes. A grandes rasgos, definida cuando las células β no generan BEA.

Existen diversos modelos matemáticos que describen el comportamiento de la célula β [6, 7], entre ellos el propuesto por Pernarowsky reportado en la Ref. [5] es el más ampliamente utilizado por su facilidad de interpretación de la dinámica no lineal del páncreas. Este modelo se compone por tres ecuaciones diferenciales acopladas, que al variar algunos de sus parámetros se obtienen diferentes tipos de bursting, entre ellos el bursting cuadrado.

Es bien conocido que una parte importante de la validación de los modelos matemáticos es la reproducción experimental del fenómeno que modelan [1-13]. Una de las aproximaciones para realizar la validación anterior es mediante la

implementación electrónica del modelo matemático. Este tipo de aproximación es ampliamente utilizada para validar modelos de fenómenos complejos tales como el caos presente en sistemas dinámicos no lineales. Además de que la implementación electrónica de los modelos matemáticos permite estudiar las relaciones entrada-salida (excitaciones y respuestas) de un sistema [8-10]. En el caso específico de la célula β estudiada en este trabajo, podría ser la obtención de un laboratorio virtual electrónico que de oportunidad de analizar diversas condiciones (padecimientos) de la célula β pancreática [11-12].

Por lo tanto en este trabajo se propone el diseño de un circuito electrónico basado en amplificadores operaciones de voltaje (OpAmps) y multiplicadores analógicos para emular el comportamiento dinámico de la célula β . En específico se utiliza la metodología de computación analógica para implementar las tres ecuaciones diferenciales del modelo matemático de Pernarowsky. El diseño propuesto utiliza esquemas diferenciales para reducir el conteo de componentes electrónicos activos, los cuales permitieron reducir el número a catorce cuando se compara contra los veinticuatro de otros diseños antes publicados [13]. Además, se presentan los resultados de la aplicación de las técnicas de escalamiento en amplitud y escalamiento en frecuencia sobre el modelo de Pernarowsky. Lo anterior nos permite controlar la amplitud del BEA, así como la escala de tiempo. En la sección 2 se describe el modelo matemático Pernarowsky y las condiciones bajo las cuales se produce **bursting cuadrado**. En la sección 3 se explican los pasos de diseño electrónico para la implementación electrónica de la célula β . La sección 4 muestra los resultados de la simulación a nivel circuito electrónico utilizando SPICE. Finalmente, la sección 5 resume las conclusiones.

2. Modelo matemático de la célula β

Las células β presentan oscilaciones complejas en el potencial de la membrana denominado **bursting**. El **bursting** característico de la célula beta en estado activo se denomina **bursting cuadrado** y existen varios modelos matemáticos que lo describen, entre los cuales se encuentra el modelo propuesto por Pernarowsky [6, 7]. Este modelo permite simular el comportamiento dinámico de una sola célula β

dentro del islote de Langerhans y se compone de tres ecuaciones diferenciales acopladas. Estas se pueden dividir en dos subsistemas, uno rápido y uno lento [9, 6], donde el subsistema rápido está dado por:

$$\begin{aligned}\dot{u} &= f(u) - \omega - c, \\ \dot{\omega} &= \omega_{\infty}(u) - \omega,\end{aligned}$$

Mientras que el subsistema lento es descrito por

$$\dot{c} = \epsilon(h(u) - c). \quad (1)$$

Donde u es el potencial de la membrana, ω es el voltaje del canal de activación de potasio y c la concentración de sustancias que regulan el BEA, tales como calcio intracelular, calcio en el retículo endoplásmico y ADP. El modelo matemático de Pernarowsky presenta funciones no-lineales de las cuales se deriva el bursting. Estas no linealidades son polinomios de tercer grado dependientes de la variable u , representados por las funciones $f(u)$, $\omega_{\infty}(u)$ y $h(u)$, como se muestran en (2). Anteriormente se ha propuesto utilizar funciones lineales a trozos (PWL) para estudiar la dinámica no lineal de un sistema complejo [12].

$$\begin{aligned}f(u) &= -\frac{\alpha}{3}u^3 + \alpha\hat{u}u^2 + (1 - \alpha(\hat{u}^2 - \eta^2))u \\ \omega_{\infty}(u) &= \left(1 - \frac{\alpha}{3}\right)u^3 + \alpha\hat{u}u^2 - (2 + \alpha(\hat{u}^2 - \eta^2))u - 3 \\ h(u) &= \beta(u - u_{\beta})\end{aligned} \quad (2)$$

Considerando el siguiente conjunto de valores para los parámetros en (1), $\alpha = \frac{1}{4}$, $\eta = \frac{3}{4}$, $\hat{u} = \frac{3}{2}$, $\beta = 4$, $u_{\beta} = -0.954$, $\epsilon = 0.0025$ [5]; se obtiene mediante MATLAB el comportamiento dinámico de las variables de estado \dot{u} , $\dot{\omega}$ y \dot{c} , el cual presenta las oscilaciones conocidas como bursting (figuras 1 y 2), donde la variable de estado u es la que corresponde a las oscilaciones de la membrana de la célula.

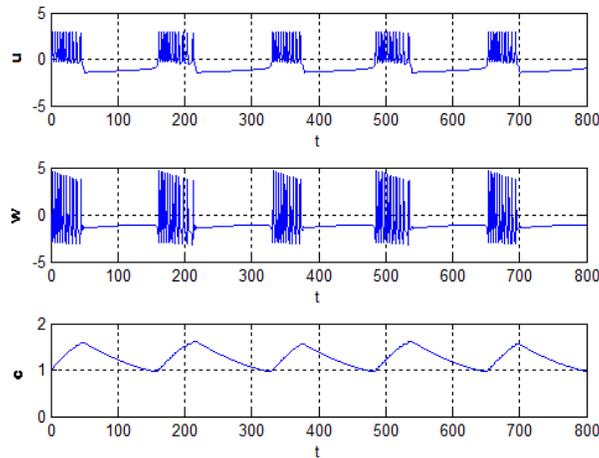


Figura 1 Bursting característico de una célula β activa y sana.

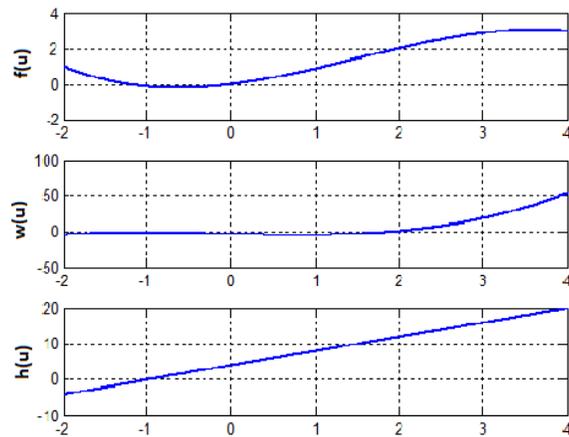


Figura 2 Comportamiento de las funciones en (2).

Una de las características más importantes del modelo propuesto por Pernarowsky es la dinámica tan diversa que presenta ante cambios en algunos de los valores de sus parámetros, ante estos cambios se presentan cinco tipos de bursting denominados beating, bursting parabólico, semiparabólico y tapered [1] (figura 3). El bursting cuadrado (figura 3a) se caracteriza por una fase activa con picos cuyos máximos y mínimos locales son casi constantes y tienen un valor por encima de la fase silenciosa. El beating (figura 3a), en comparación con el bursting cuadrado, carece de fase silenciosa pero es igual en magnitud. El bursting parabólico (figura 2b) tiene como característica principal un perfil que asemeja una parábola. El bursting semiparabólico (figura 3c) se caracteriza por sus mínimos

locales en el spiking que se encuentran por debajo de la fase silenciosa. Finalmente el tapered tienen una fase activa sobre amortiguada (figura 2d).

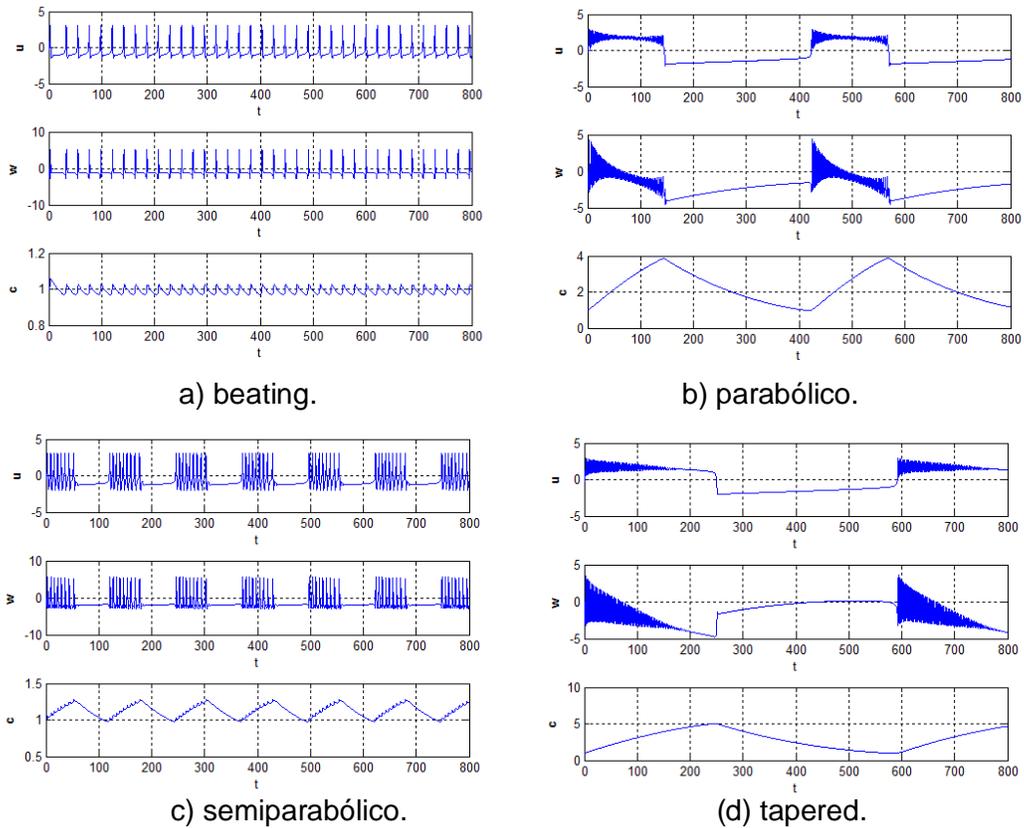


Figura 3 Diferentes tipos de bursting.

Para el caso de los diferentes tipos de oscilaciones se varían los parámetros η y \hat{u} que toman distintos valores para cada tipo de bursting (tabla 1).

Tabla 1 Parámetros de η y \hat{u} para obtener los distintos tipos de bursting.

η	\hat{u}	Tipo de oscilación
3/4	3/2	Bursting de onda cuadrada
1	3/2	Beating
3/4	1	Bursting de amplitud parabólica
5/4	1	Bursting semiparabólico
1/2	9/4	Tapered

El bursting también depende de escalas de tiempo distintas, esta escala de tiempo es representada en el sistema de ecuaciones (1) por ϵ , y toma el valor de 0.0025.

3. Implementación electrónica usando OpAmps

En este trabajo se diseñan tres circuitos electrónicos que representan las tres variables de estado de la ecuación (1). Estos circuitos a su vez contienen otros sub circuitos que representan las no linealidades del sistema dadas en la ecuación (2).

Dada la respuesta de las ecuaciones no lineales (ver figura 2) donde $\omega_\infty(u)$ y $h(u)$ tienen una ganancia de hasta 50 y 20 unidades, respectivamente. Suponiendo que se traslada directamente a un circuito electrónico, este tendría una salida de voltaje de 50V y 20V, respectivamente, para cada ecuación, la cual es una ganancia muy grande y no apta para su implementación física, por lo que se propone escalar las funciones.

$k_1=1$, $k_2=5$ y $k_3=2$, representan los parámetros de escalamiento en amplitud para las ecuaciones 3.

$$\begin{aligned} x &= \frac{u}{k_1} & u &= xk_1 \\ y &= \frac{\omega}{k_2} & \omega &= yk_2 \\ z &= \frac{c}{k_3} & c &= zk_3 \end{aligned} \quad (3)$$

Para el nuevo sistema de ecuaciones se tienen nuevos nombres para las variables de estado, así como para las ecuaciones no lineales, siendo x , y y z las nuevas ecuaciones u , ω y c , respectivamente. El resultado del proceso de escalamiento son unas nuevas ecuaciones que describen las variables de estado dadas en ecuaciones 4.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{\left(-\frac{a}{3}(xk_1)^3 + a\hat{u}(xk_1)^2 + (1 - a(\hat{u}^2 - \eta^2))(xk_1)\right) - (yk_2) - (zk_3)}{k_1}, \\ \dot{y} &= \frac{\left(\left(1 - \frac{a}{3}\right)(xk_1)^3 + a\hat{u}(xk_1)^2 - (2 + a(\hat{u}^2 - \eta^2))(xk_1) - 3\right) - (yk_2)}{k_2}, \end{aligned}$$

$$\dot{z} = \frac{\epsilon \left((\beta((xk_1) - u_\beta)) - (zk_3) \right)}{k_3} \quad (4)$$

De igual forma que el modelo original, las nuevas variables de estado presentan no linealidades representadas por las ecuaciones 5.

$$f(x) = \frac{-\frac{a}{3}(xk_1)^3 + a\hat{u}(xk_1)^2 + (1 - a(\hat{u}^2 - \eta^2))(xk_1)}{k_1},$$

$$y(x) = \frac{\left(1 - \frac{a}{3}\right)(xk_1)^3 + a\hat{u}(xk_1)^2 - (2 + a(\hat{u}^2 - \eta^2))(xk_1) - 3}{k_2},$$

$$h(x) = \frac{\beta \left((xk_1) - u_\beta \right)}{k_3} \quad (5)$$

Una vez sustituidos todos los parámetros de las ecuaciones (4) y (5) para una célula β activa se obtienen las ecuaciones 6 y 7 [5].

$$\dot{x} = (f(x)) - 5y - 2z,$$

$$\dot{y} = (y(x)) - y,$$

$$\dot{z} = \epsilon((h(x)) - z). \quad (6)$$

$$f(x) = -\frac{1}{12}x^3 + \frac{3}{8}x^2 + \frac{37}{64}x,$$

$$y(x) = \frac{11}{60}x^3 + \frac{3}{40}x^2 - \frac{31}{64}x - \frac{3}{5},$$

$$h(x) = 2x + 1.0908 \quad (7)$$

Dadas las nuevas funciones escaladas, se procede a realizar la implementación electrónica, para esto se realiza un diagrama a bloques de manera general (figura 4) que describe las ecuaciones 6.

El diagrama a bloques de la figura 4 muestra los bloques principales. Estos incluyen tres funciones no lineales $f(x)$, $y(x)$ y $h(x)$, así como tres bloques integradores, “1/s”, para obtener la solución de las derivadas de las variables de estado x , y , z , descritas por las ecuaciones (6). Finalmente un bloque de ganancia “epsilon” y tres bloques sumadores algebraicos.

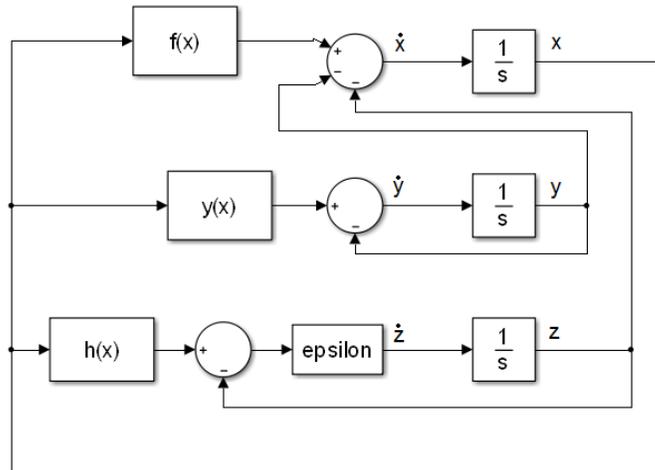


Figura 4 Diagrama de bloques de las variables de estado en (6).

Para la implementación electrónica de los bloques de la figura 4 se utilizan topologías con amplificadores operacionales de voltaje. En este contexto, los integradores, “1/s”, son diseñados con la configuración típica de integrador inversor. Los sumadores de tres entradas se diseñan con la configuración de sumador inversor, mientras que en los casos donde solo se tienen dos entradas al sumador, se utiliza una configuración de amplificador diferencial.

En lo que respecta a la implementación de las ecuaciones no lineales $f(x)$, $y(x)$ y $h(x)$, se propone lo siguiente: en el caso de $f(x)$, dado que es un polinomio de tercer grado, posee un término cubico y uno cuadrado, los cuales serán representados por circuitos multiplicadores de voltaje (figura 5). Además la función $f(x)$ tiene tres ganancias $G1$, $G2$ y $G3$ las cuales se obtienen mediante la configuración de amplificador inversor (figura 6). Finalmente se suman los términos usando un amplificador en configuración sumador inversor.

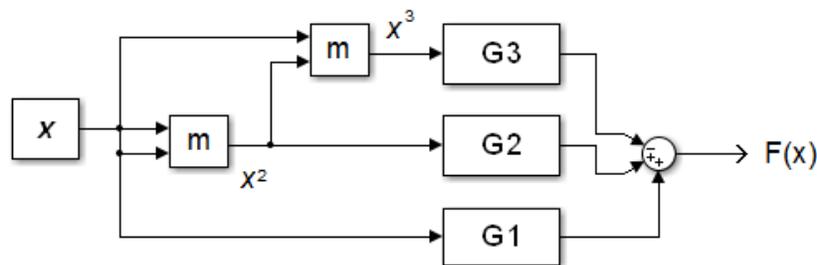


Figura 5 Diagrama de bloques para la función no lineal $f(x)$.

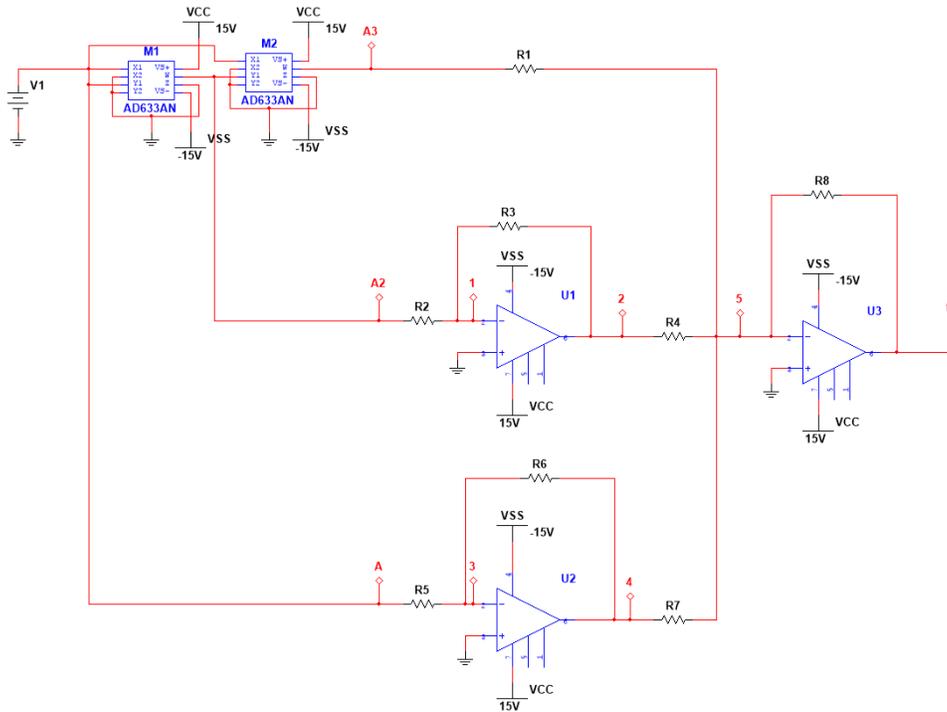


Figura 6 Circuito electrónico de $f(x)$ utilizando opamps y multiplicadores.

En forma análoga al caso de la función $f(x)$, se diseñan las funciones $y(x)$ y $h(x)$ (7). Para la función $y(x)$ se utilizan dos multiplicadores de voltaje, cuatro ganancias $G4, G5, G6, G7$, y un sumador como se muestra en la figura 7. En específico, $G4$ no tiene una entrada debido a que representa una constante y esta se diseña mediante una fuente de voltaje independiente $V1$. La síntesis del diagrama a bloques de la figura 6 utilizando dispositivos electrónicos se muestra en la figura 8. Para el caso de $h(x)$ el diagrama a bloques y su equivalente con dispositivos electrónicos se muestra en la figuras 9 y 10, respectivamente.

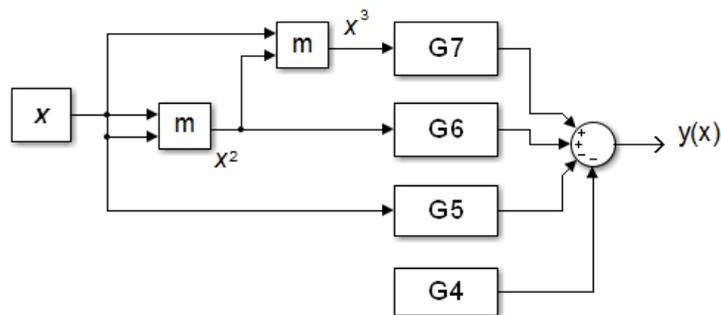


Figura 7 Diagrama de bloques para la función no lineal $y(x)$.

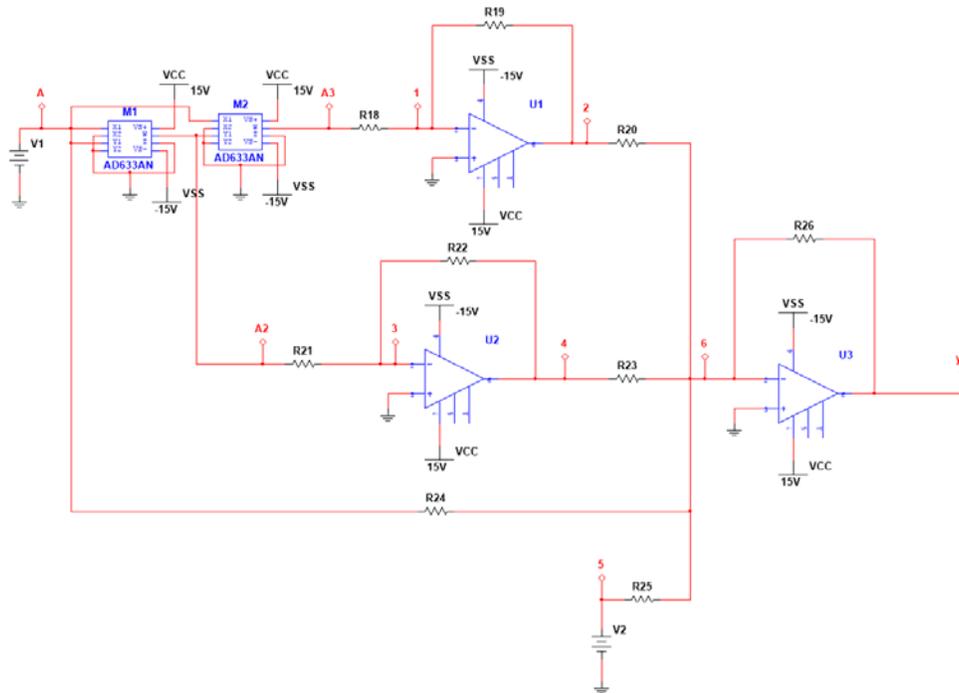


Figura 8 Circuito electrónico de $y(x)$ utilizando opamps y multiplicadores.

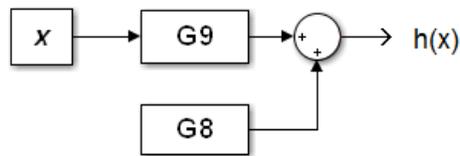


Figura 9 Diagrama de bloques para la función no lineal $h(x)$.

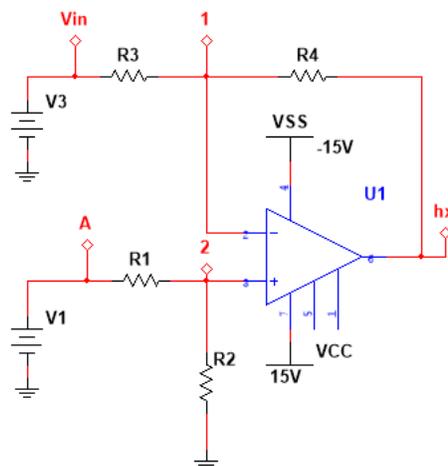


Figura 10 Circuito electrónico de $h(x)$ utilizando opamps.

Los diagramas de bloques que describen las ecuaciones no lineales (figuras 5, 7 y 9), incluyen los bloques G1, G2,..., G9, los cuales representan las ganancias de los amplificadores de voltaje de acuerdo con las ecuación (7) se obtiene la Tabla 2.

Tabla 2 Valores de las ganancias para las ecuaciones no lineales en figuras 4, 6, 8.

Ganancias	Valor	Ganancias	Valor
G1	37/64	G5	-31/64
G2	3/8	G6	3/40
G3	-1/12	G7	11/60
G4	-3/5	G8	1.0908
G5	-31/64	G9	2

4. Resultados

Una vez que los bloques $f(x)$, $y(x)$ y $h(x)$ de la figura 4 han sido diseñados, entonces la síntesis con circuitos electrónicos del diagrama a bloques de la figura 4, el cual describe una célula β , se muestra en la figura 11.

Una vez descritos los circuitos que describen las funciones no lineales en (7) (figuras 6, 8, 10), se obtienen las funciones de transferencia en (8) utilizando análisis de circuitos usando Leyes de Kirchhoff.

$$\begin{aligned}
 f(x) &= -R8 \left(\frac{A^3}{R1.100} - \frac{R3.R4.A^2}{R2.10} - \frac{R6.R7.A}{R5} \right), \\
 y(x) &= -R26 \left(-\frac{R19.R20.A^3}{R18.100} - \frac{R22.R23.A^2}{R21.10} + R24.A + 0.6V.R25 \right), \\
 h(x) &= \frac{R38}{R37} (A - 5V).
 \end{aligned} \tag{8}$$

De forma similar se obtuvieron las funciones de transferencia para las variables de estado x , y y z (figura 11)

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= - \left(\left(\frac{R11.R12}{R10.R14.R15.C1} - \frac{R11.R12}{R14.R15.C1} \right) y - \frac{R12}{R14} f(x) + \left(\frac{1}{R16.C1} z \right) \right), \\
 \dot{y} &= - \frac{1}{R31.C2} \left(\frac{R28}{R27} y - \frac{R28}{R27} y(x) \right) \\
 \dot{z} &= - \frac{1}{R45.C3} \left(\frac{R42}{R41} z - \frac{R42}{R41} h(x) \right).
 \end{aligned} \tag{9}$$

Tabla 3 Valores de los componentes de la implementación electrónica.

Componentes	Valor kΩ
R4, R7, R8, R9, R10, R12, R13, R14, R20, R23, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R37, R39	10
R1	1.2
R2	4.8
R3, R22	18
R5	640
R6	370
R18	6
R19	110
R21	24
R24	20.6
R38, R40	20

En la figura 12 se muestra el comportamiento de las funciones $f(x)$, $y(x)$ y $h(x)$ que tienen una salida de voltaje de entre 10 y 11 V, lo cual es aceptable para un sistema físico, de igual forma para las nuevas variables de estado conformadas por las ecuaciones (6) se tienen los tres circuitos acoplados que representan el comportamiento de la célula β activa (figura 13).

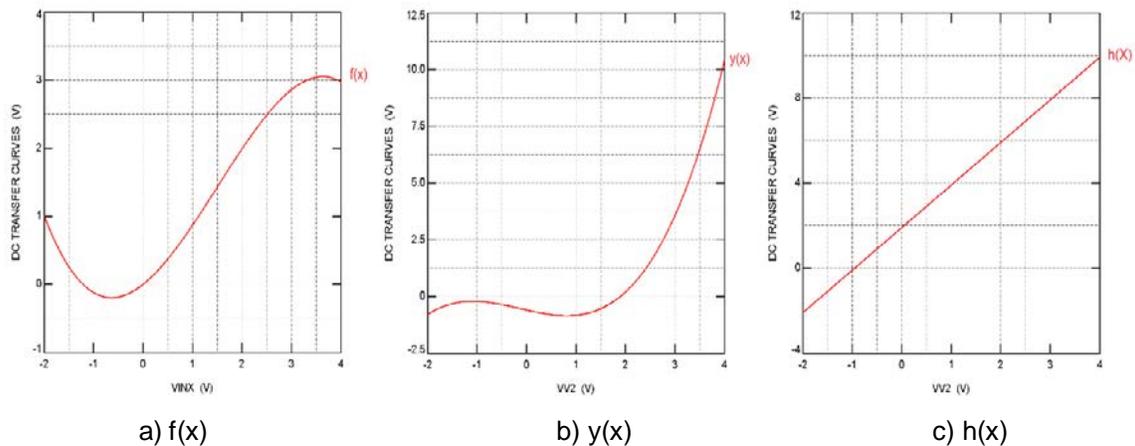


Figura 12 Comportamiento de las ecuaciones al realizar un barrido en DC de -2 a 4 V.

Como se mencionó en las secciones anteriores existen diferentes tipos de bursting que se presentan al variar los parámetros η y \hat{u} , de las ecuaciones propuestas por Pernarowsky [5]. Estos parámetros en el circuito se representan por los

componentes R2, R6, R21 y R24 (figuras 6 y 8), los cuales varían dependiendo del tipo de oscilación que se quiera mostrar. Para que el circuito muestre el bursting característico de la célula beta (BEA) (figura 1), los componentes muestran los siguientes parámetros: R2= 4.8 k Ω , R6= 370 k Ω , R21= 24 k Ω y R24= 20.6 k Ω .

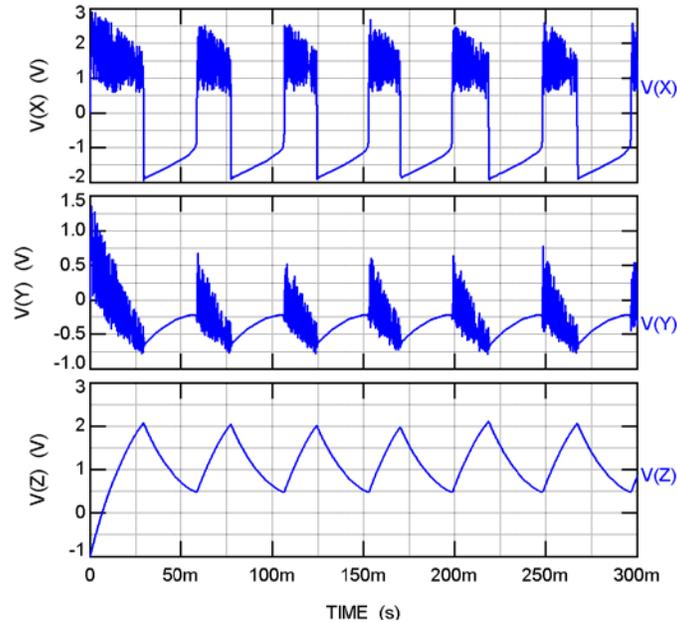


Figura 13 Oscilaciones eléctricas en voltaje para célula β en figura 10 bursting cuadrado.

5. Conclusiones

Se han presentado tres circuitos electrónicos acoplados que describen el comportamiento de una célula beta a partir del modelo matemático de Pernarowsky usando amplificadores operacionales y multiplicadores analógicos. Se demostró que los tres circuitos realizados son capaces de emular correctamente la dinámica no lineal de la célula beta y que los distintos comportamientos se pueden obtener al variar pocos parámetros de los componentes que lo describen. Los circuitos resultantes han sido implementados utilizando dispositivos comerciales tales como amplificadores operacionales LM741 y con multiplicadores AD633. Se demostró que mediante el empleo de esquemas diferenciales es posible reducir el número de componentes electrónicos

activos, los cuales permitieron reducir el número a catorce en comparación a otras aproximaciones.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] M. Pernarowsky, "Fast subsystem bifurcations in a slowly varying Liénard system exhibiting bursting". *SIAM Journal on Applied Mathematics*. Vol. 54. Nº 3. 1994. Pp. 814-832.
- [2] C. P. Olvera Granados, G. E. Leo Amador y H. L. Hernández Montiel, "Pancreas y célula beta: Mecanismos de diferenciación, morfogénesis y especificación celular endocrina, ¿Regeneración?". *Mediagráfica Artemisa*. Vol. 65. 2008.
- [3] C. P. Olvera Granados, G. E. Leo Amador, H. L. Hernández Montiel, "Pancreas y célula beta: Mecanismos de diferenciación, morfogénesis y especificación celular endocrina, ¿Regeneración?". *Mediagráfica Artemisa*. Vol. 65. 2008.
- [4] E. Jones y A. Manson, "Lo esencial en célula y genética". Elsevier. 2003.
- [5] R. M. Miura, "Analysis of excitable cell models". *Journal of Computational and Applied Mathematics*. Vol. 144. 2002. Pp. 29-47.
- [6] P. Georgiou y C. Toumazou, "A silicon pancreatic beta cell for diabetes". *IEEE Trans. Biomedical Circuits Syst.* Vol. 1. Nº 1. 2007. Pp. 39-49.
- [7] I. Pagkalos, P. Herrero, C. Toumazou, P. Georgiou, "Bio-inspired glucose control in diabetes based on an analogue implementation of a beta cell model". *IEEE Trans. Biomedical Circuits Syst.* Vol. 8. Nº 2. 2014. Pp. 186-195.
- [8] M. Pernarowski, "Fast and slow subsystems for a continuum model of bursting activity in the pancreatic islet". *SIAM Journal on applied mathematics*. 1988. P. 58.
- [9] M. Pernarowsky, R. M. Miura, J. Kevorkian, "The Sherman-Rinzel-Keizer Model for Bursting Electrical activity in the Pancreatic Beta-Cell". *Springer Lecture Notes in Biomathematics*. Nº 92. 1991. Pp. 34-53.

- [10] K. Wedgwood, "The synchronization of pancreatic beta-cell by gap junction coupling". Mathematics MSc Final Report Summer. 2009.
- [11] R. Griffiths, "Return map characterizations of singular solutions for a model of bursting with two slow variables". Ph.D. Thesis. Montana State. 2003.
- [12] J. M. Muñoz Pacheco, L. C. Gomez Pavon, O. G. Félix Beltrán, A. L. Ramos, "Determining the Lyapunov spectrum of continuous-time 1D and 2D multiscroll chaotic oscillators via the solution of m-PWL variational equations". *Abstract and Applied Analysis*. Vol. 2013. Pp. 1-11. 2013.
- [13] L. J. Ontañón García, E. Campos Cantón, J. Sánchez Sahagún, I. Campos Cantón, "Electronic implementation of a pancreatic β -cell". XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA. 2014.

7. Autores

V. Fernández-Carreón es egresada de la Licenciatura en Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con intereses en la investigación del Caos, área de comunicaciones, control y procesamiento de señales. Actualmente se encuentra en el proceso del ingreso a la Maestría en Ingeniería en Electrónica de la BUAP.

Jesús Manuel Muñoz-Pacheco obtuvo los grados de Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias, ambos en la especialidad de Electrónica, del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en el 2005 y 2009 respectivamente. Del 2009 al 2013 fue Profesor-Investigador de Tiempo Completo en la Universidad Politécnica de Puebla, y desde mediados de 2012 se unió a la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla como profesor investigador titular "A". Sus intereses de investigación incluyen síntesis sistemática, modelado de comportamiento y simulación de circuitos y sistemas lineales y no-lineales; osciladores caóticos, sincronización de caos; y aplicaciones del caos. El Dr. Muñoz-Pacheco es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI-CONACyT) nivel 1 y sirve como miembro regular del consejo editorial y revisor técnico de revistas científicas indexadas con factor de impacto.

O. G. Félix-Beltrán es Doctora en Ciencias (Física) y obtuvo su grado en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en el 2003. Del 2003 al 2005 fue Profesor-Asociado en la Universidad Autónoma de México, desde 2005 a la fecha se encuentra laborando en la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla como Profesor Investigador. Félix-Beltrán pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI-CONACyT) nivel 1. Una de las líneas de investigación en que la investigadora trabaja es en sistemas no lineales (caos).

E. Zambrano-Serrano obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en el 2012. Actualmente, es candidato a Doctor en el Departamento de Matemáticas Aplicadas del IPICYT; y encuentra realizando una estancia de investigación científica en el Centro para el Caos y las Redes Complejas en City University de Hong Kong bajo la dirección del Prof. Dr. Guanrong Chen. Sus intereses de investigación incluyen osciladores caóticos, sincronización de caos; y sistemas caóticos de orden fraccional.