



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Informe Técnico

Modelo electrónico de modulación de la memoria a corto plazo

**José Luis Pérez Silva
Antonio Garcés Madrigal
Francisco Caviedes Contreras
Andrea Miranda Vitela**

13 de mayo de 2013

Modelos Electrónicos de Neuronas

Modelo electrónico de modulación de la memoria a corto plazo

José Luis Pérez Silva, Antonio Garcés Madrigal, Francisco Caviedes Contreras, Andrea Miranda Vitela

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los efectos de modulación de la memoria a corto plazo en función tanto del retardo axonal, como del umbral en modelos electrónicos de neuronas tipo McCulloch y Pitts, así como de integradora con fugas, con función de activación tipo escalón. Mostraremos que si se puede controlar el retardo axonal, así como el umbral, podemos tener diferentes formas en el ciclo de histéresis de respuesta de la neurona lo que significa, diferentes estados de memoria a corto plazo.

Índice

	Introducción	4
1.	Modelo de neurona	5
2.	Neurona tipo Mcculock y Pitts	7
3.	Resultados del modelo Mcculock y Pitts	8
4.	Modelo de neurona integradora con fugas	11
5.	Modulación por el umbral en neurona Mccullock y Pitts	15
6.	Modulación por el umbral en neurona integradora con fugas	18
7.	Modulación por el retardo en neurona Mccullokk y Pitts con inhibiciones.	21
8.	Modulación por el umbral en neurona Mccullokk y Pitts con inhibiciones.	24
9.	Modulación por el retardo en neurona integradora con inhibiciones.	27
10.	Modulación por el umbral en neurona integradora con inhibiciones.	30
	Conclusiones	33
	Referencias	33

Introducción

En la década de los años 50, Cragg y Temperley propusieron, tomando una analogía con los fenómenos de histéresis observados en los materiales ferromagnéticos, que un arreglo localizado de neuronas en ciertas regiones cerebrales podría presentar un comportamiento multiestable y dar origen a una respuesta de histéresis a estímulos periódicos (Cragg, y Temperley, 1955). A partir de la aparición de este trabajo, diferentes investigadores han estudiado los mecanismos que pueden dar origen a fenómenos de histéresis, tanto en arreglos neuronales grandes, como en circuitos pequeños. En general, estos estudios se han basado en considerar al fenómeno de memoria a corto plazo como aquellos procesos neuronales que presentan una respuesta de histéresis, cuya duración supera a la del estímulo que la provocó (Guigon, y Burnod, 1995).

Esta idea ha sido aplicada, en fechas recientes, al nivel de una sola neurona. Sin embargo, los modelos propuestos para que una sola neurona genere una respuesta de histéresis involucran, ya sea, funciones de activación complejas (en el caso de las neuronas artificiales), o, por otro lado, procesos electroquímicos igualmente complejos (en el caso de las neuronas biológicas). Nuestro grupo de investigación ha mostrado (Pérez, *et al.*, 1996) que un modelo analógico simple de neurona puede dar origen a fenómenos de memoria a corto plazo si sus variables dinámicas se ajustan de manera apropiada. Estos resultados se basaron en la demostración de que una neurona analógica, de manera natural, constituye un elemento de memoria debido a que su respuesta no se genera de manera instantánea. Esto es, una neurona analógica presenta una respuesta desfasada respecto al estímulo externo que la afectó.

En este trabajo presentamos una extensión de los resultados anteriores, al diseñar un modelo electrónico de neurona en el cual se genera un efecto de histéresis en su respuesta, y se resalta la importancia que presentan los efectos tanto del de retardo axonal como del umbral en la descripción de los procesos neuronales. Como la respuesta de la neurona depende de la clase de estímulo que la afecta, mostramos que se pueden generar diferentes efectos de memoria de acuerdo a la naturaleza del estímulo externo.

En particular, mostramos que la memoria neuronal puede pasar por diferentes estados dependiendo de la relación que exista entre el estímulo externo y la magnitud tanto del retardo axonal, como del umbral. En este trabajo se presentan los efectos de modulación de la memoria a corto plazo en función del retardo axonal y del umbral en los modelos electrónicos de neuronas tipo McCulloch y Pitts, así como de integradora con fugas, con función de activación tipo escalón. Mostraremos que si se puede controlar el retardo axonal o el umbral, podemos tener diferentes formas en el ciclo de histéresis como respuesta de la neurona lo que significa, diferentes estados de memoria a corto plazo.

Podemos con este modelo electrónico de neurona generar los llamados procesos evocativos, que pueden, en principio, corresponder a los estados de la memoria a corto plazo y por lo mismo evocar circunstancias anteriores y responder con acciones específicas a estos estímulos de entrada.

1. Modelo de neurona

El modelo neuronal propuesto por Warren S. McCulloch y Walter Pitts en 1943 (McCulloch, and Pitts 1943) fue el primer modelo neuronal moderno, y ha sido tomado como punto de partida para el desarrollo de muchos de los modelos neuronales actuales, además de que es utilizado como punto de referencia para evaluar el comportamiento de otros modelos.

McCulloch y Pitts parten de cinco consideraciones acerca del comportamiento de las neuronas. Dichas consideraciones las plantean de la siguiente forma:

1. La actividad neuronal es un proceso "todo o nada".
2. Un cierto número fijo de sinapsis debe ser excitado dentro de un período de adición latente en orden de excitar una neurona en cualquier intervalo de tiempo, y este número es independiente de la actividad previa y la posición de la neurona.
3. El único retardo significativo dentro del sistema es el retardo sináptico.
4. La actividad de cualquier sinapsis inhibitoria previene absolutamente la excitación de la neurona en ese intervalo de tiempo.
5. La estructura de la red no cambia con el tiempo.

Estas consideraciones describen a lo que se ha conocido como la neurona "McCulloch-Pitts".

El modo de operación de la neurona McCulloch-Pitts es simple. Durante el tiempo de integración, la neurona responde a la actividad de su sinapsis, la cual refleja el estado de las células presinápticas. Si no hay sinapsis inhibitorias activas, la neurona suma sus entradas sinápticas y verifica si la suma de ellas alcanza o excede su nivel de umbral. Si lo hace, entonces la neurona se vuelve activa. Si no, la neurona permanece inactiva. En caso de que exista alguna sinapsis inhibitoria activa, la neurona permanece inactiva.

Este modelo lo podemos expresar en forma matemática simple como

La cual es:

$$Salida = \begin{cases} \sum_{i=1}^n i_n \geq Umbral = 1 \\ \sum_{i=1}^n i_n < Umbral = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Una neurona integradora con fugas se puede entender como un dispositivo procesador de señales que recibe n señales externas

$$\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]^T \in \mathcal{R}^n \quad (2)$$

y genera una única respuesta $y \in \mathcal{R}$. El vector $\mathbf{x}$ contiene las señales que arriban a la neurona provenientes de n neuronas vecinas, inclusive de la neurona misma. Ahora bien, la capacidad para procesar señales que presenta la neurona puede ser representada por un mapeo no lineal, F_{ne} , del vector de entradas a la respuesta neuronal; esto es,

$$F_{ne}: \mathbf{x} \in \mathcal{R}^n \rightarrow y \in \mathcal{R}. \quad (3)$$

La función F_{ne} se modela en dos partes (M. M. Gupta and D. H. Rao, 1994):

- a) una operación de confluencia y
- b) una operación de activación no lineal.

Con la operación de confluencia $\odot$ se modelan las llamadas operaciones sinápticas, de agregación y de umbral que se observan en las neuronas biológicas. Debido a esto, se dice que la operación de confluencia proporciona una medida de similitud entre el llamado vector de entradas aumentado

$$\mathbf{x}_a = [x_0, x_1, \dots, x_n]^T \in \mathcal{R}^{n+1} \quad (4)$$

y el vector aumentado de pesos sinápticos

$$\mathbf{w}_a = [w_0, w_1, \dots, w_n]^T \in \mathcal{R}^{n+1}, \quad (5)$$

donde la componente w_0 corresponde a un término de sesgo o umbral. Finalmente, con la operación de activación no lineal se lleva a cabo un mapeo no lineal sobre la medida de similitud.

De manera más precisa, las operaciones sinápticas y de umbral pueden ser entendidas como un mapeo lineal del espacio de dimensión $(n+1)$ $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^{n+1}$ al espacio $z \in \mathcal{R}$, donde z recibe el nombre de entrada dendrítica. Esto es, se tiene que

$$z = \mathbf{w}_a \odot \mathbf{x}_a, \quad (6)$$

la cual, en general, se toma como un producto interno entre los vectores $\mathbf{x}_a$ y $\mathbf{w}_a$. Ahora bien, si las señales de entrada que recibe la neurona y/o alguno de los parámetros neuronales, e.g., los pesos sinápticos, son dependientes del tiempo, entonces el modelo de neurona se denomina dinámico. En este caso, la operación neuronal F_{ne} se convierte en un sistema dinámico

$$F_{ne}: \mathbf{x}(t) \in \mathcal{R}^n \times \mathcal{R} \rightarrow y(t) \in \mathcal{R} \times \mathcal{R}, \quad (7)$$

cuya forma explícita depende de la forma particular que presenten las operaciones de confluencia y de activación. Por ejemplo, si consideramos un vector de señales dependientes del tiempo de la forma

$$\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T \in \mathcal{R}^n \times \mathcal{R} \quad (8)$$

y si asumimos que el vector de pesos $\mathbf{w}$ es invariable en el tiempo, entonces la operación sináptica toma la forma:

$$z(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} = \sum_{i=1}^n w_i x_i(t), \quad (9)$$

donde $z(t)$ es la entrada dendrítica dependiente del tiempo. Bajo estas condiciones, la operación de agregación se puede establecer de la manera siguiente:

$$\tau \frac{du(t)}{dt} + u(t) = z(t) = \sum_{i=1}^n w_i x_i(t) \quad (10)$$

donde $u(t)$ es ahora la actividad de la neurona dependiente del tiempo. Esta ecuación diferencial se conoce como el modelo de integrador con fugas y es ampliamente usada en el área de redes neuronales debido, tanto a su posible interpretación biológica, como a su posible implantación electrónica. Finalmente, la función de activación no lineal Ψ mapea la actividad de la neurona $u \in [-\infty, \infty]$ a una respuesta neuronal acotada, esto es, $y = \Psi(u)$.

2. Neurona tipo McCullock y Pitts

Nuestro diseño electrónico de neurona para la memoria a corto plazo, es fundamentalmente el modelo electrónico de la neurona tipo McCullock y Pitts a la que se le añadió un retardo axonal. Nuestro modelo electrónico nos permite poder variar el retardo, y el umbral en la función de activación tipo escalón y la amplitud de las respuestas de la neurona. En la figura 1 se muestra el diagrama esquemático del diseño electrónico básico. Es claro que el modelo electrónico es un sistema de cómputo analógico que representa la ecuación de nuestro modelo matemático.

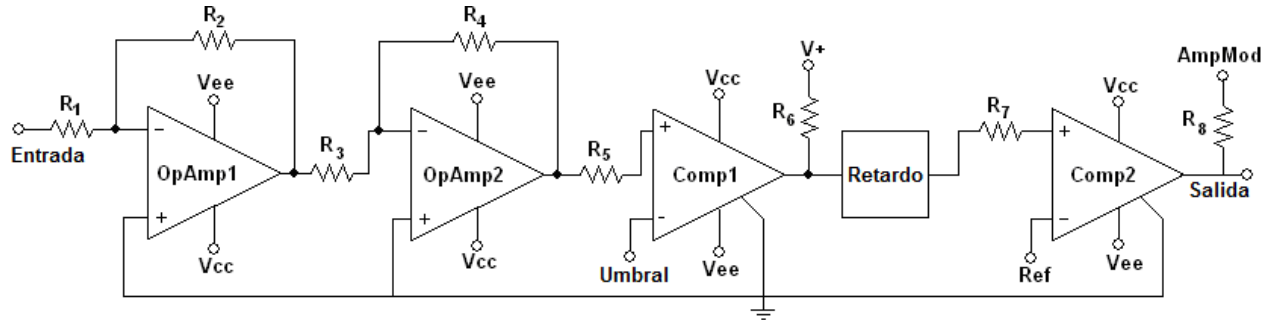


Figura 1. Diagrama esquemático del modelo electrónico de neurona no integradora.

3. Resultados del modelo McCullock y Pitts

En el primer experimento se consideró como entrada una señal triangular con amplitud de 5 V. El umbral de la neurona se fijó en 2 V y se varió el retardo en 5 unidades de éste que se fijaron en 20ms. Los resultados se muestran en la figura 2. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona sin retardo axonal, y la última muestra el ciclo de histéresis para el máximo retardo analizado que fue de 100 ms.

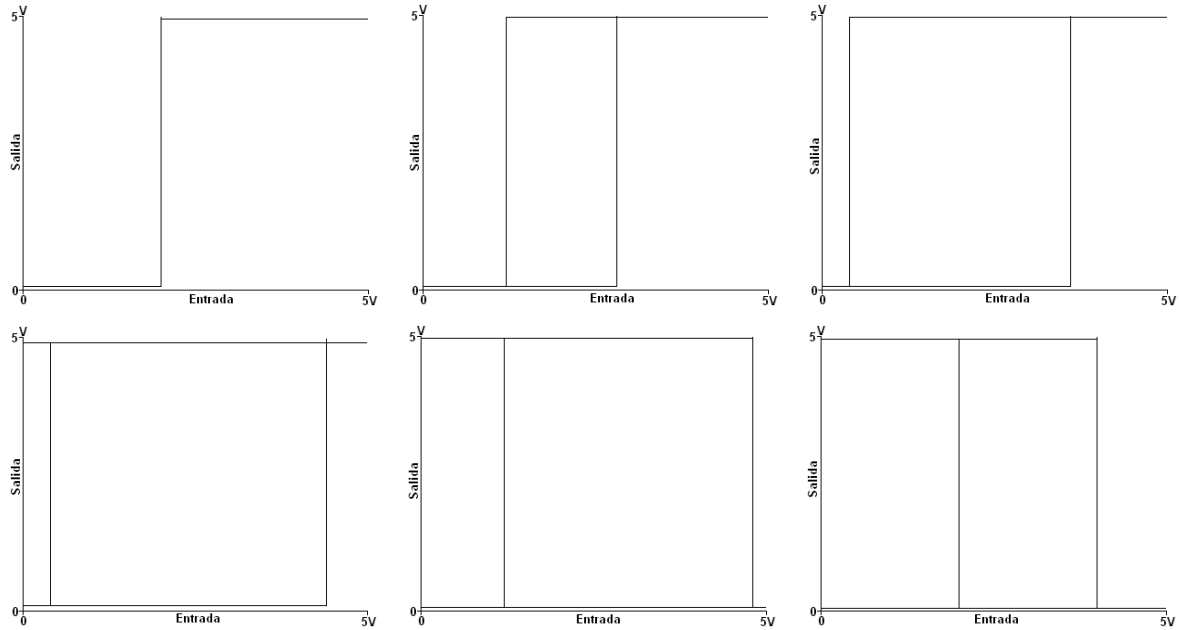


Figura 2. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona con la variación del retardo axonal para el primer experimento.

En el segundo experimento se consideró como entrada una señal senoide amortiguada y amplitud de 5V. El umbral de la neurona se fijó en 2 V y se varió el retardo en cinco unidades. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.

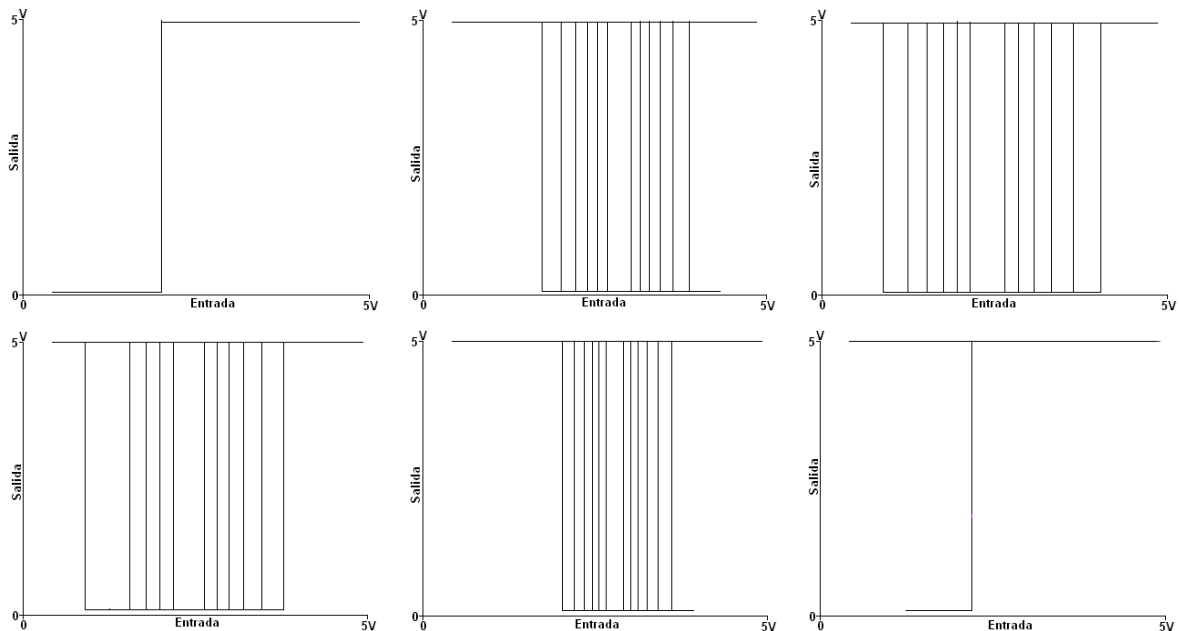


Figura 3. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona con la variación del retardo axonal para el segundo experimento.

En el tercer experimento se consideró como entrada una señal senoide amortiguada con frecuencia de 20 Hz corrimiento de 5 V y amplitud de 5 V. El umbral de la neurona fue una señal triangular de 5 V de amplitud y frecuencia de 2 Hz con factor de amortiguamiento de 5, y se varió el retardo en cinco unidades. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.

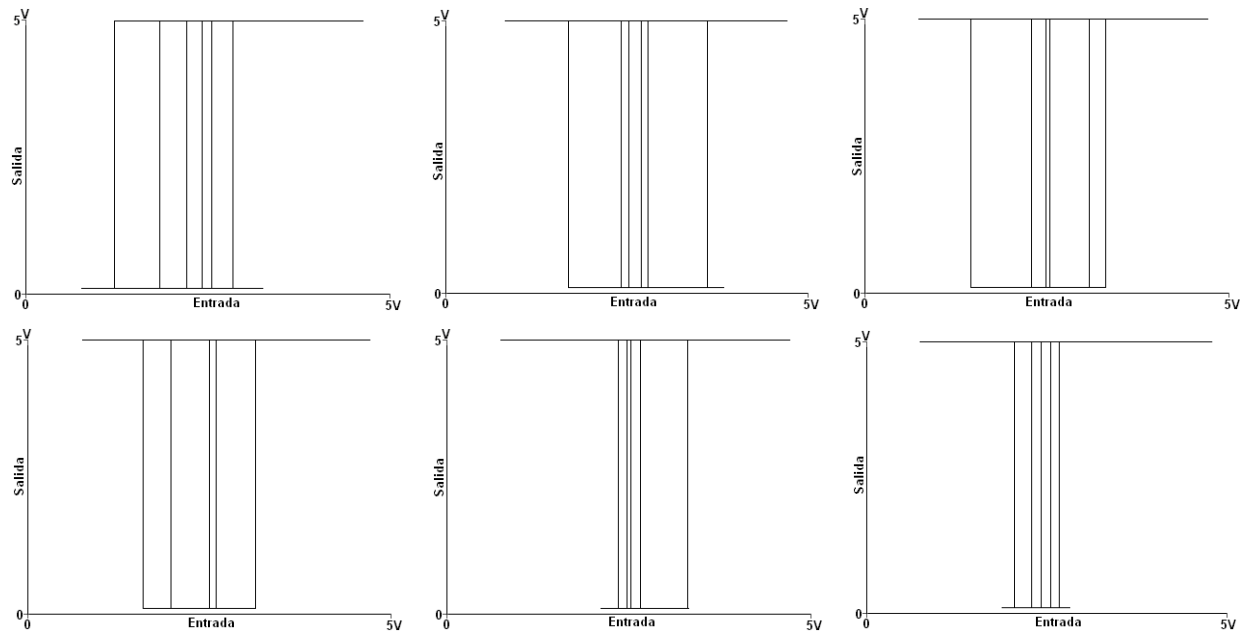


Figura 4. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona con la variación del retardo axonal para el tercer experimento.

En el siguiente experimento la señal entrada es una senoide amortiguada con corrimiento de 5V y amplitud de 5V. El umbral de la neurona fue una triangular de 5V de amplitud y 10Hz de frecuencia. La amplitud de la respuesta estaba modulada por una triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz. Se varió el retardo en cinco unidades. Los resultados son los de la figura 5.

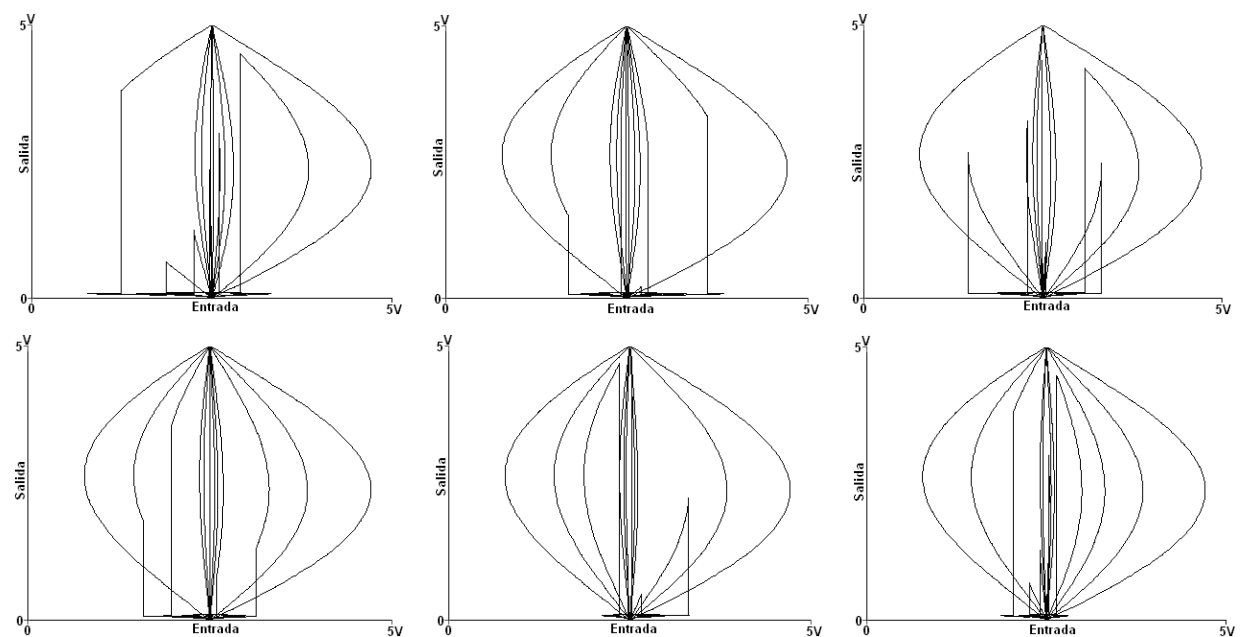


Figura 5. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona con la variación del retardo axonal para el cuarto experimento.

En el siguiente la entrada fue una señal triangular con frecuencia de 2 Hz, y amplitud de 5 V. El umbral fue una señal senoide amortiguada con factor de amortiguamiento de 5, de 5 V de amplitud y frecuencia de 10 Hz. La amplitud de la respuesta estaba modulada por una senoide de 5 V de amplitud y frecuencia de 20 Hz. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6.

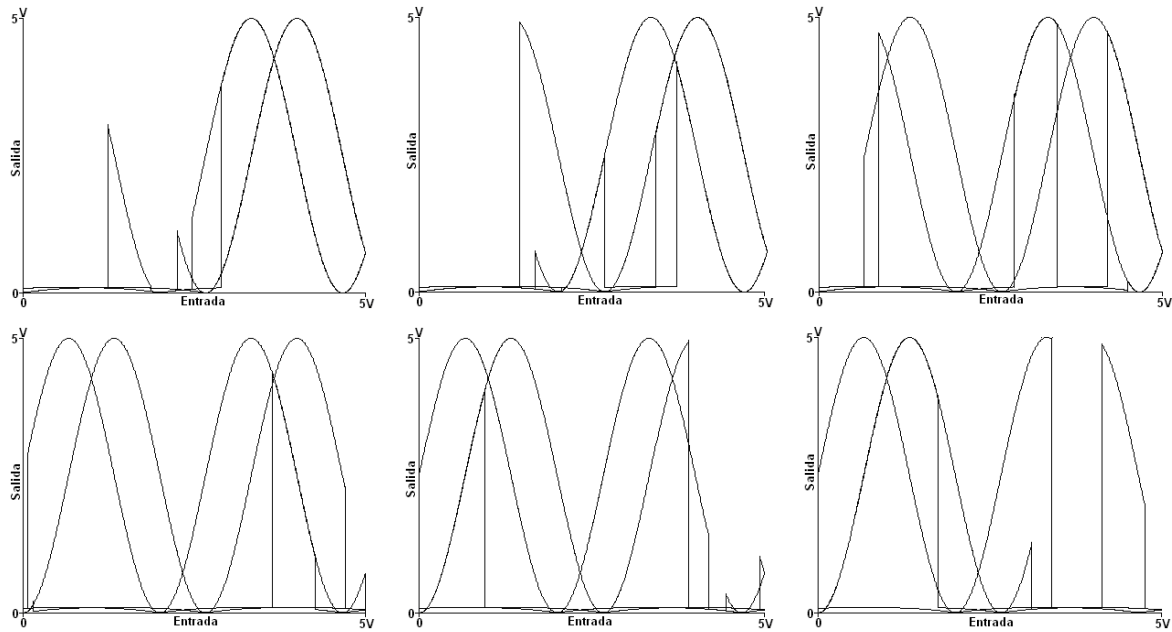


Figura 6. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona con la variación del retardo axonal para el quinto experimento.

En el siguiente los parámetros son los mismos, pero la amplitud de la respuesta estaba modulada por una triangular de 5 V de amplitud y frecuencia de 20 Hz. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 7.

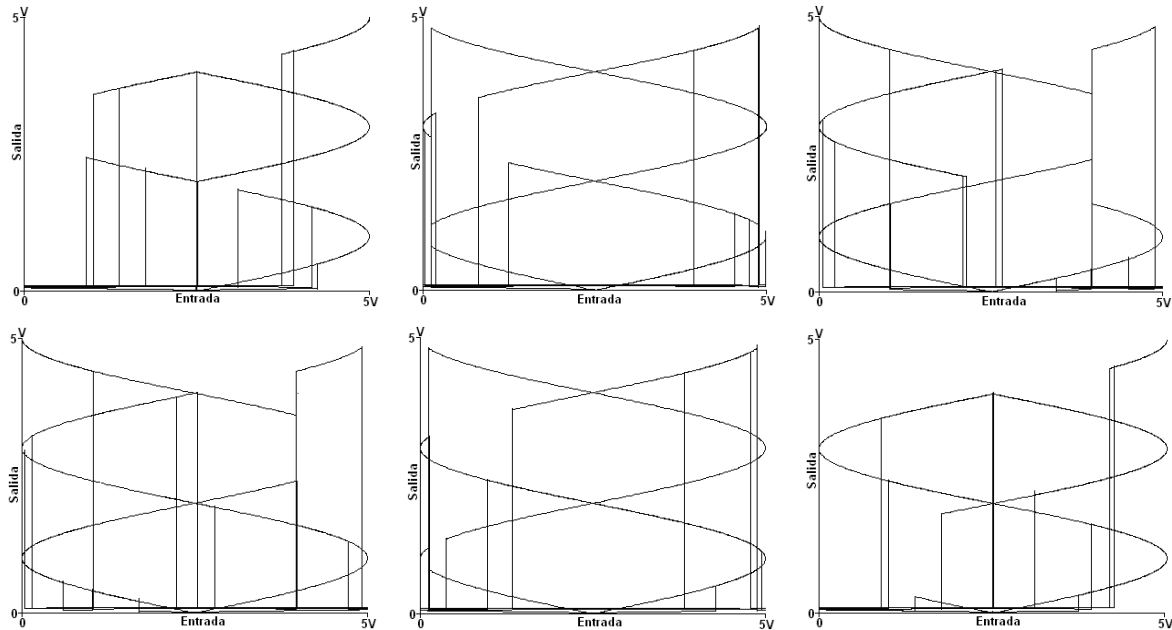


Figura 7. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona con la variación del retardo axonal para el sexto experimento.

4. Modelo de neurona integradora con fugas

El diseño electrónico de la neurona integradora con fugas para la memoria a corto plazo, es fundamentalmente el modelo electrónico de la neurona tipo McCullock y Pitts, pero con un integrador incluido, y se le añadió un retardo axonal. Nuestro modelo electrónico nos permite poder variar el retardo, así como el umbral en la función de activación tipo escalón y la amplitud de las respuestas de la neurona. En la figura 8 se muestra el diagrama esquemático del diseño electrónico básico. Es claro que el modelo electrónico es un sistema de cómputo analógico que representa la ecuación de nuestro modelo matemático.

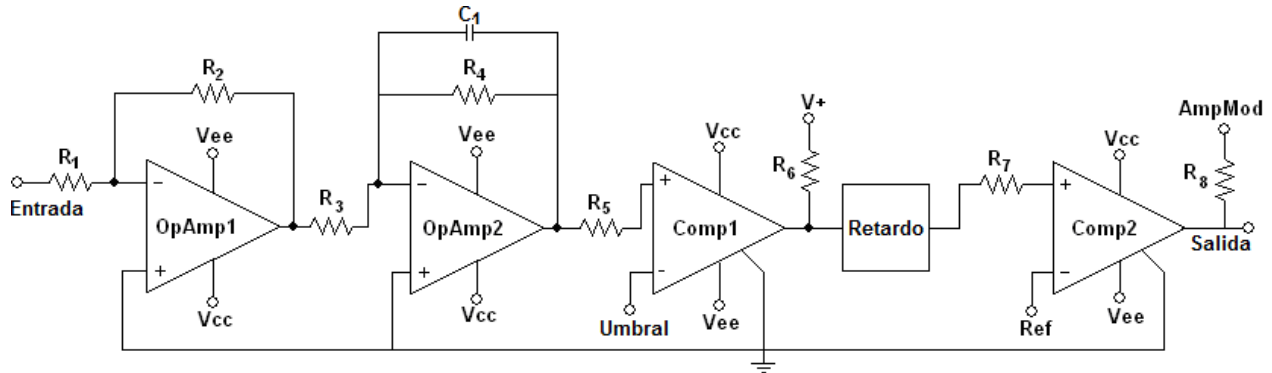


Figura 8. Diagrama esquemático del modelo electrónico de neurona integradora.

Se realizaron varios experimentos con el modelo electrónico de neurona tipo integradora con fugas con retardo axónico, para estudiar los efectos de la integración en la modulación de la memoria a corto plazo.

En el experimento la entrada fue una señal triangular con línea en tierra y amplitud de 0 a 5 V. El umbral de la neurona se fijó en 2 V y se varió el retardo en 5 unidades de éste que se fijaron en 20 ms. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 9. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona sin retardo axonal, y la última muestra el ciclo de histéresis para el máximo retardo analizado que fue de 100 ms.

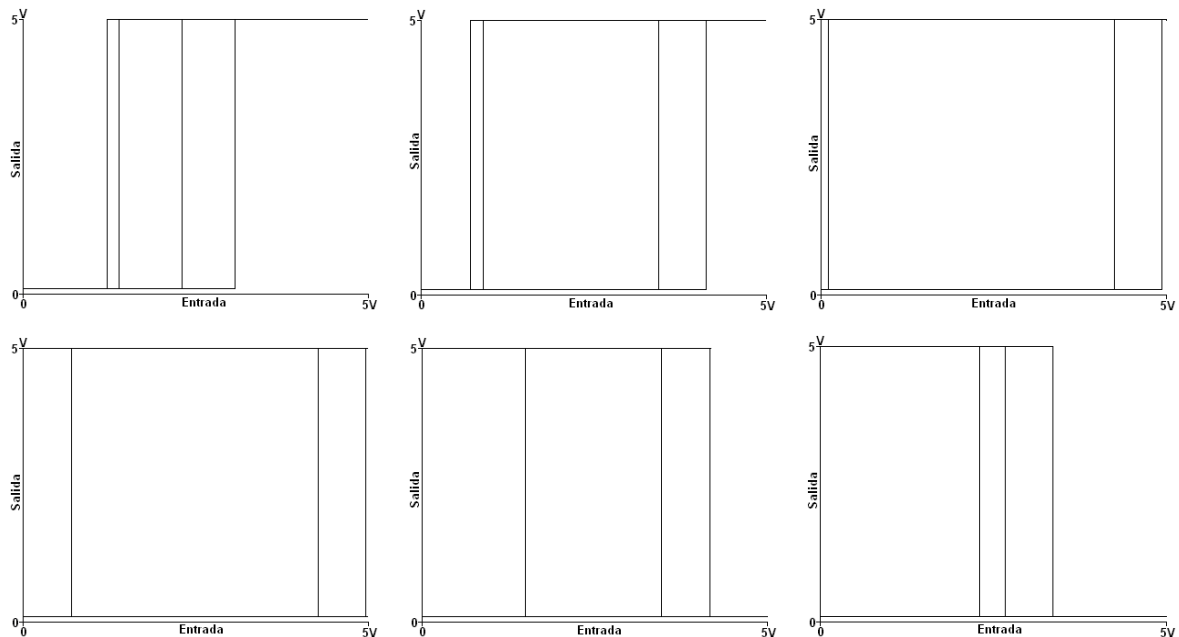


Figura 9. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del retardo axonal para el primer experimento.

En el siguiente experimento la entrada es una señal senoide amortiguada con 20 Hz de frecuencia, corrimiento de 5 V y amplitud de 5 V. El umbral de la neurona se fijó en 2. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 10.

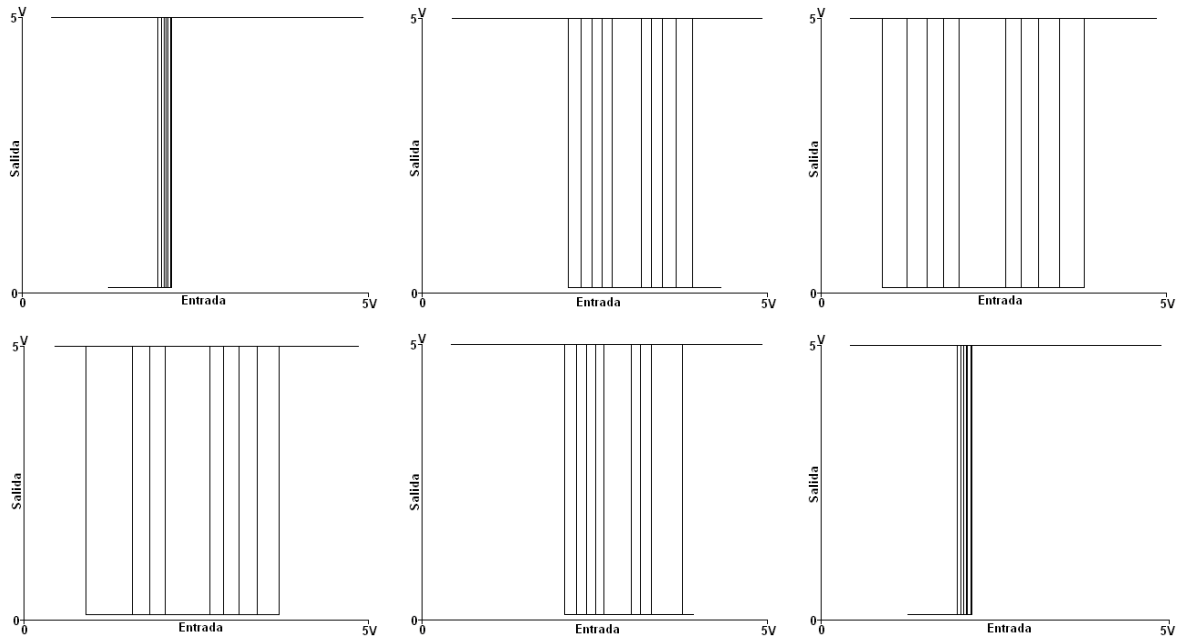


Figura 10. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del retardo axonal para el segundo experimento.

En el siguiente la entrada fue una señal senoide amortiguada con frecuencia de 20 Hz con amplitud de 5 V, y factor de amortiguamiento de 5. El umbral de la neurona fue una señal triangular de 5 V de amplitud y frecuencia de 2 Hz. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 11.

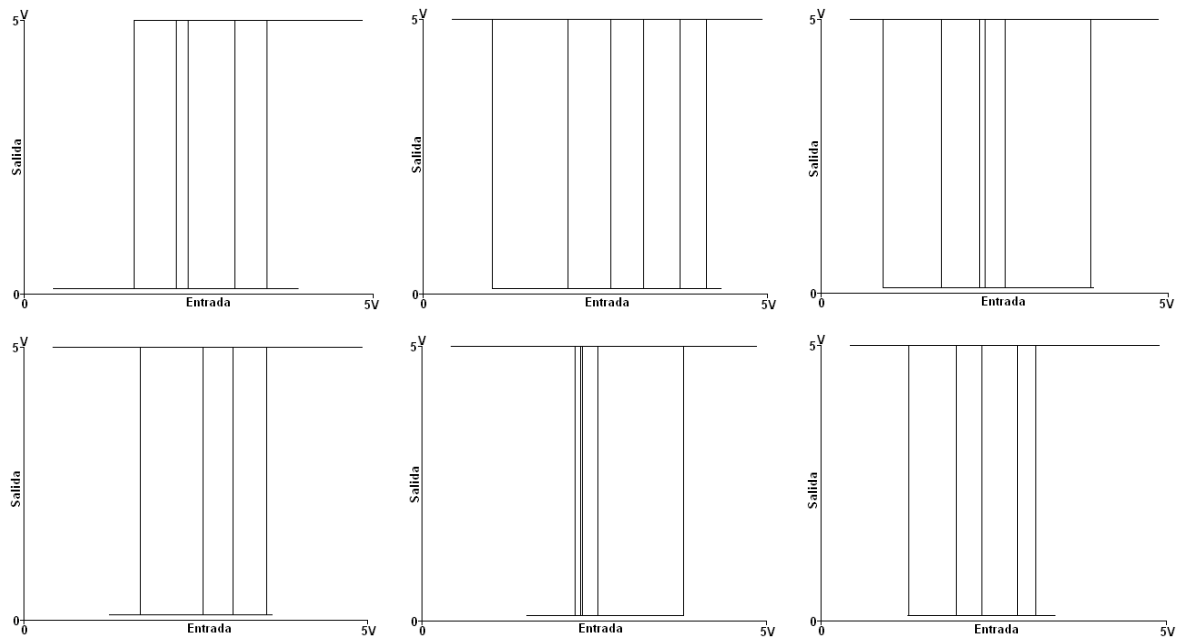


Figura 11. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del retardo axonal para el tercer experimento.

En este experimento la entrada es una señal senoide amortiguada con corrimiento de 5V y amplitud de 5V. El umbral de la neurona fue una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 10Hz. La amplitud de la respuesta estaba modulada por una triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 12.

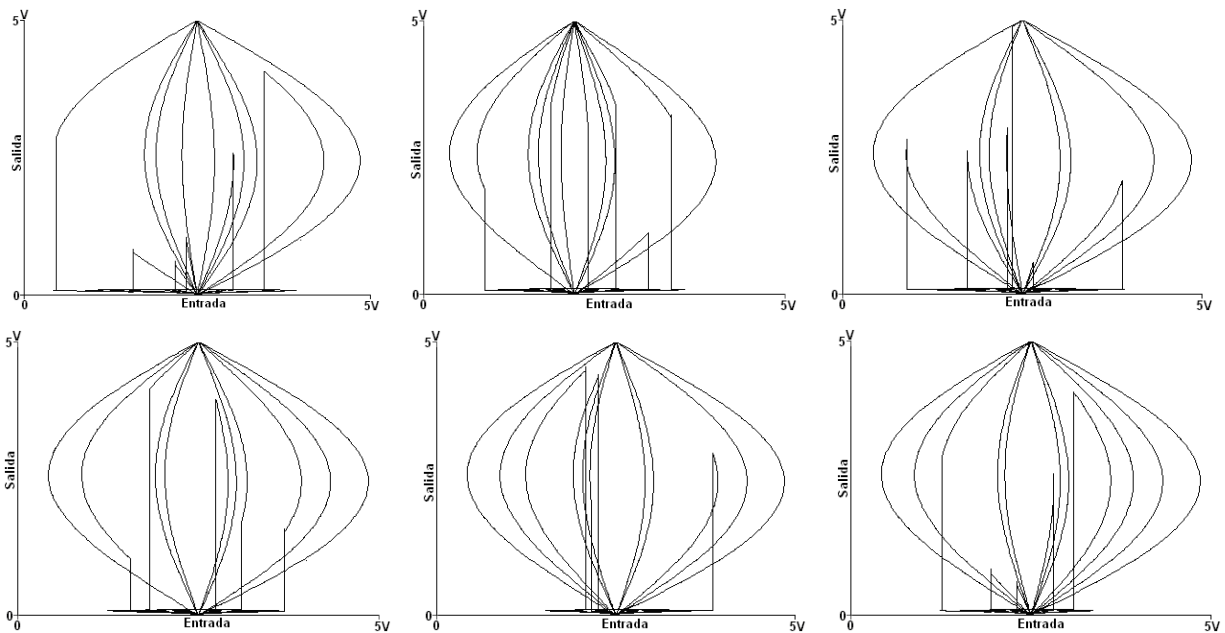


Figura 12. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del retardo axonal para el cuarto experimento.

En este experimento la entrada es una señal triangular con frecuencia de 2Hz, y amplitud de 5V. El umbral de la neurona fue una señal senoide amortiguada con factor de amortiguamiento 5, de 5V de amplitud y frecuencia de 10Hz. La amplitud de la respuesta estaba modulada por una triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 13.

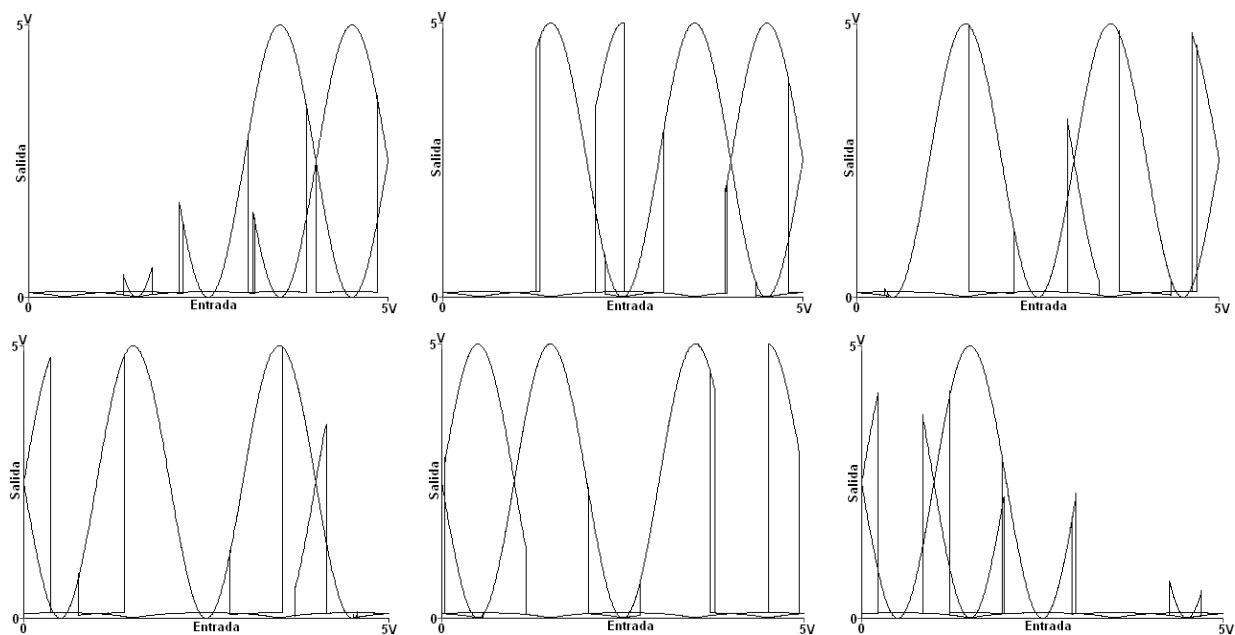


Figura 13. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del retardo axonal para el quinto experimento.

En el siguiente experimento la entrada fue una señal senoide con frecuencia de 10Hz, y amplitud de 5V. El umbral de la neurona fue una señal senoide amortiguada con factor de amortiguamiento 5, de 5V de amplitud y frecuencia de 10Hz. La amplitud de la respuesta estaba modulada por una senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz.. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 14.

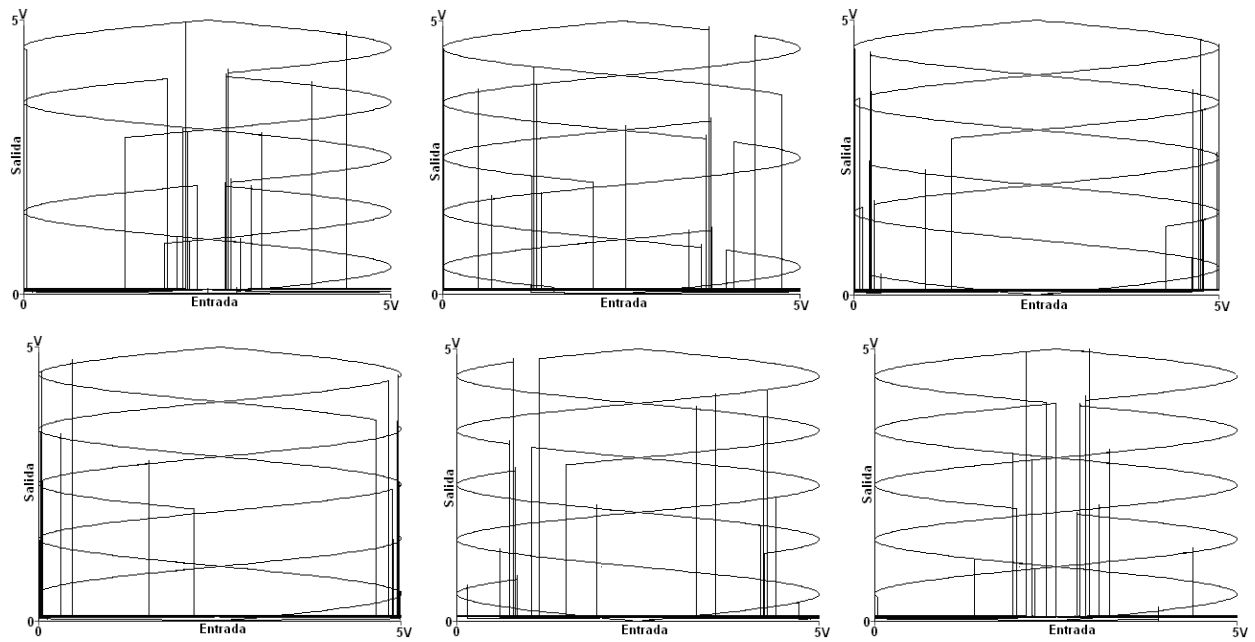


Figura 14. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del retardo axonal para el sexto experimento.

5. Modulación por el umbral en neuronas McCullock y Pitts

En el experimento la entrada es una señal triangular con amplitud de 0 a 5 V. El umbral de la neurona se varió de 0 a 5V en 1 V y se fijó el retardo en 10ms. La amplitud de salida se moduló con una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 15. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona con umbral en cero, y la última con umbral de 5V.

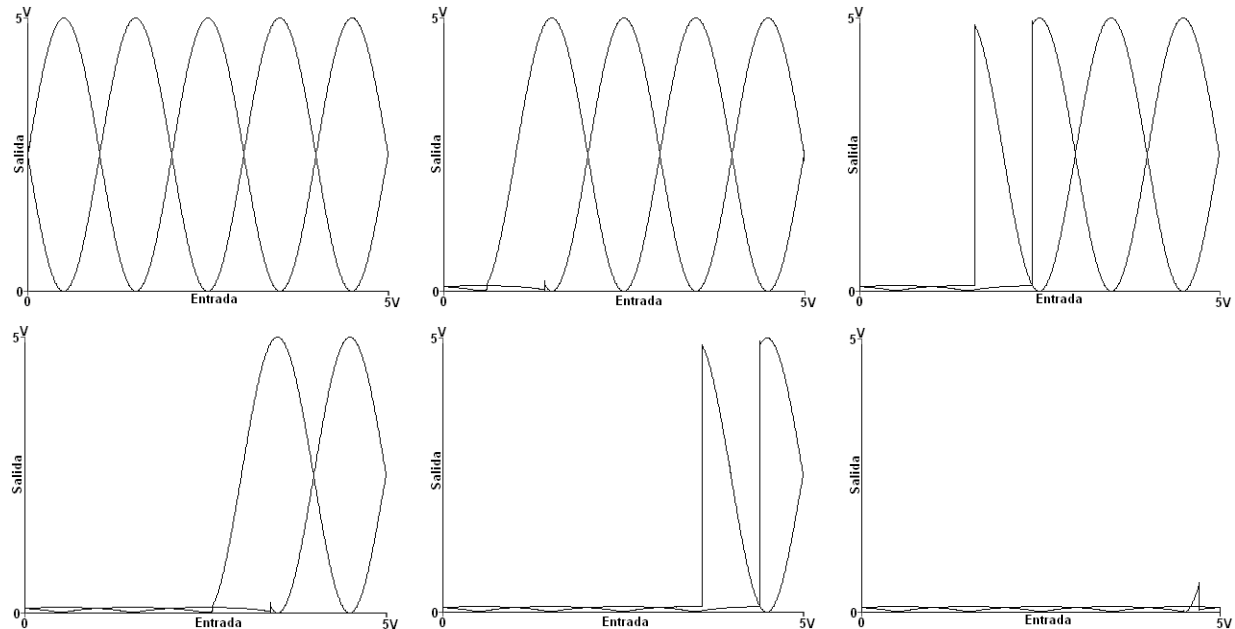


Figura 15. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con la variación del umbral para el primer experimento.

En el siguiente experimento la entrada es una señal senoide de 2Hz, con amplitud de 0 a 5 V. El umbral de la neurona se varió de 0 a 5V en 1 V y se fijó el retardo en 10ms. La amplitud de salida se moduló con una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 4 Hz. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 16.

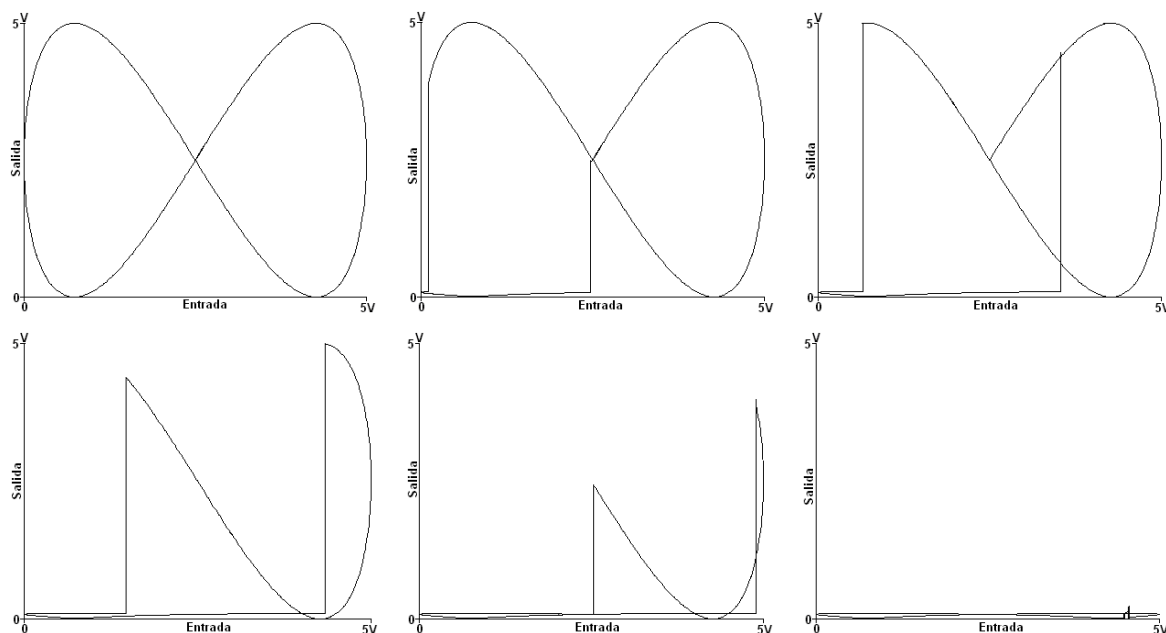


Figura 16. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con la variación del umbral para el segundo experimento.

En el tercer experimento se consideró como entrada una señal senoide amortiguada con frecuencia de 20Hz corrimiento de 5V y amplitud de 5V, con factor de amortiguamiento de 5. El umbral de la neurona se varió de 0 a 5V en 1 V y se fijó el retardo en 10ms. La amplitud de salida se mantuvo fija en 5V. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 17.

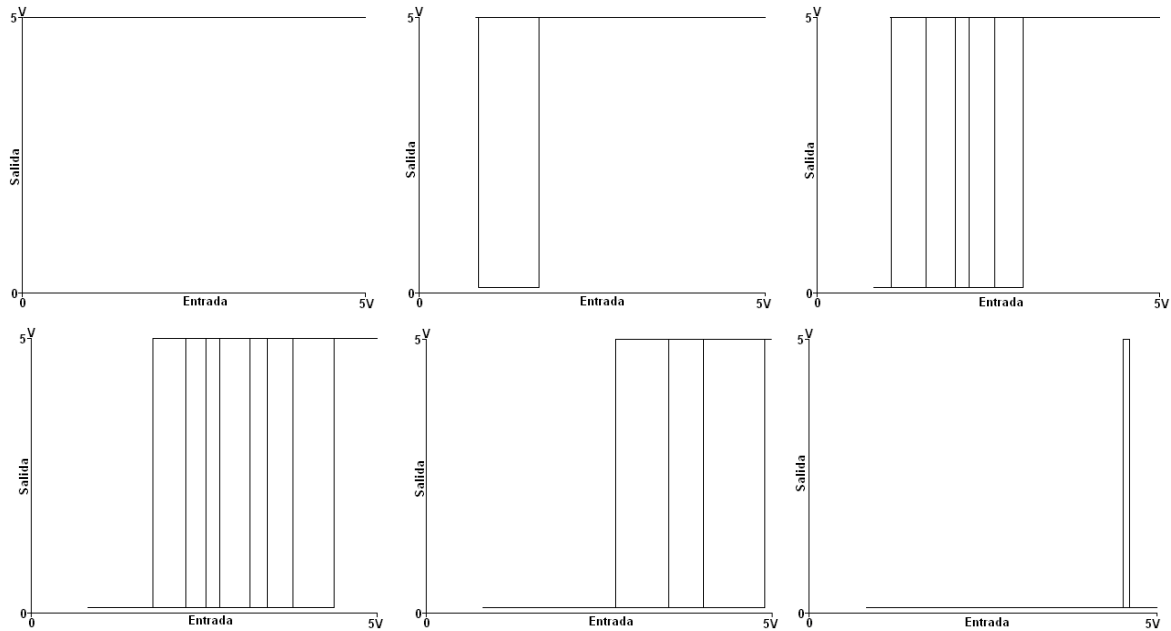


Figura 17. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del umbral para el tercer experimento.

En el cuarto experimento se consideró como entrada una señal senoide amortiguada con frecuencia de 20Hz corrimiento de 5V y amplitud de 5V, con factor de amortiguamiento de 5. El umbral de la neurona se varió de 0 a 5V en 1 V y se fijó el retardo en 10ms. La amplitud de salida se moduló con una señal triangular de 20 Hz. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 18.

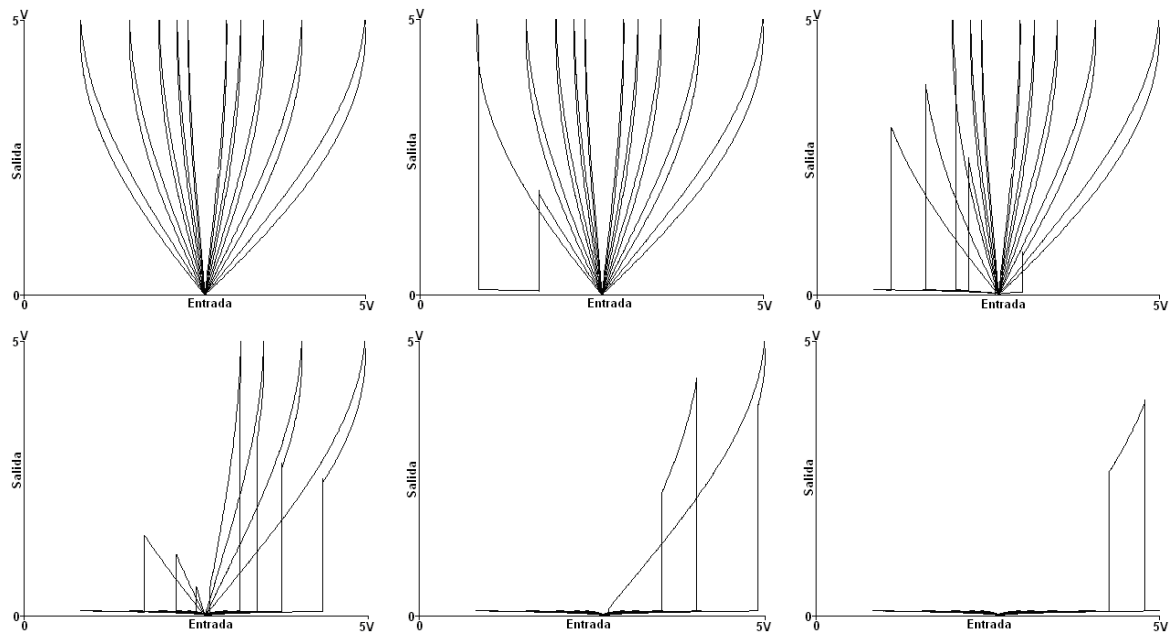


Figura 18. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con la variación del umbral para el cuarto experimento.

En el quinto experimento se consideró como entrada una señal senoide amortiguada con frecuencia de 20Hz corrimiento de 5V y amplitud de 5V, con factor de amortiguamiento de 5. El umbral de la neurona se varió de 0 a 5V en 1 V y se fijó el retardo en 10ms. La amplitud de salida se moduló con una señal senoidal de 20 Hz, y 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 19.

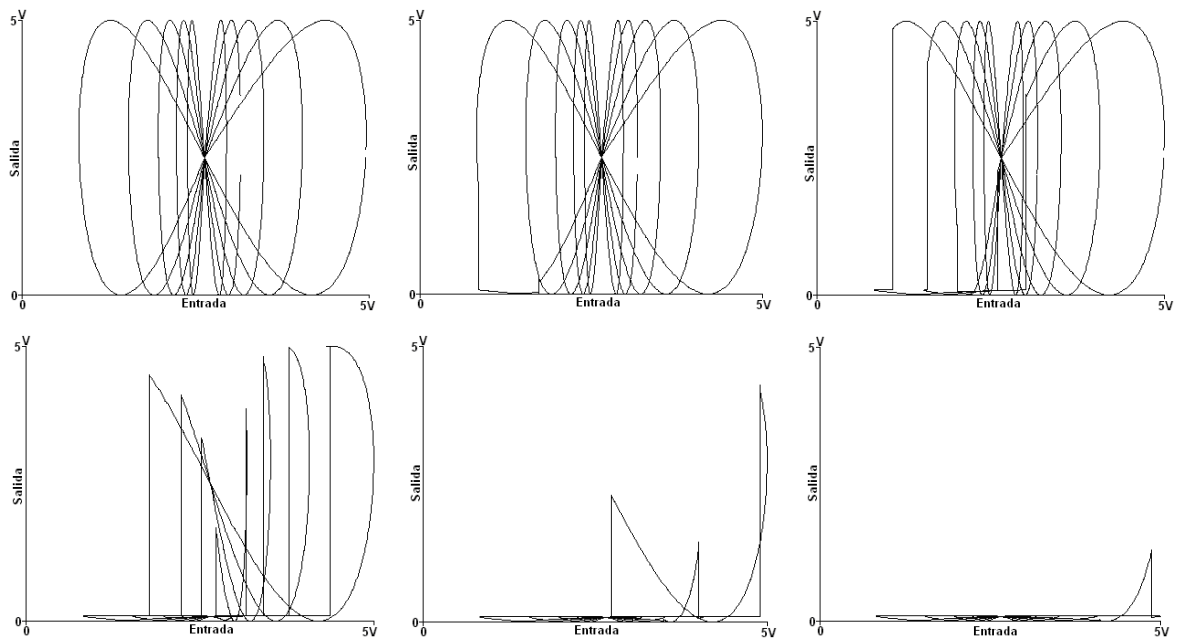


Figura 19. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con la variación del umbral para el quinto experimento.

6. Modulación por el umbral en neurona integradora con fugas

En este experimento la entrada fue una señal triangular con amplitud de 5 V. El umbral de la neurona se varió de 0 a 5V en 1 V y se fijó el retardo en 10ms. La amplitud de salida se moduló con una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 20. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona con umbral en cero, y la última con umbral de 5V.

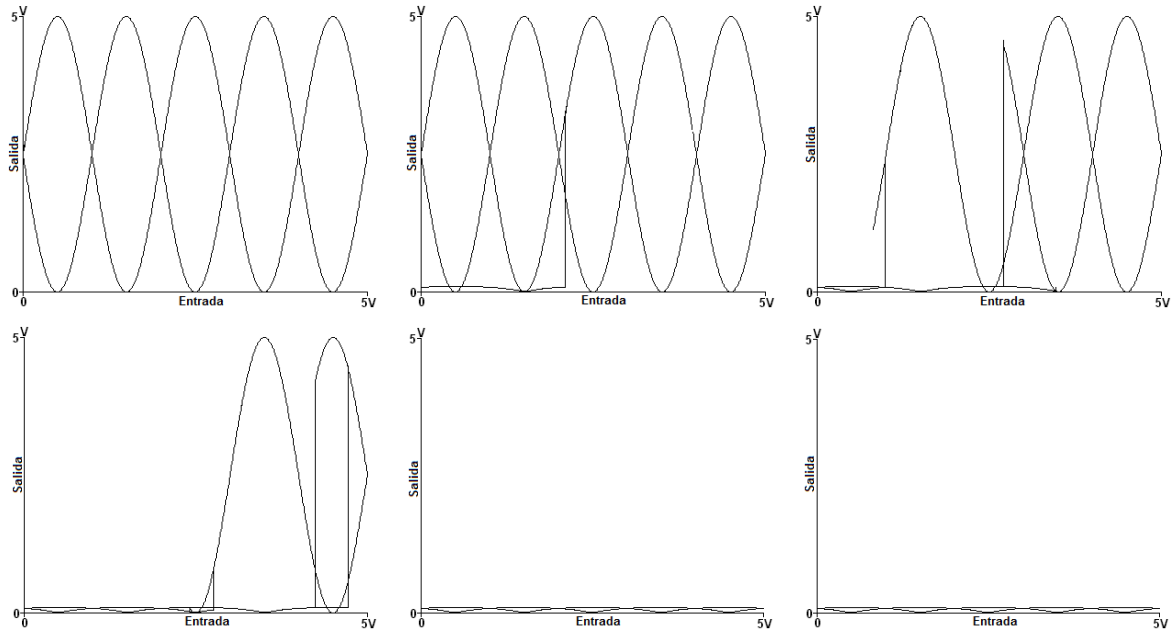


Figura 20. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del umbral para el primer experimento.

En el siguiente experimento la entrada es una señal senoide de 2Hz, mientras todos los demás parámetros de la neurona se mantienen sin cambio. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 21.

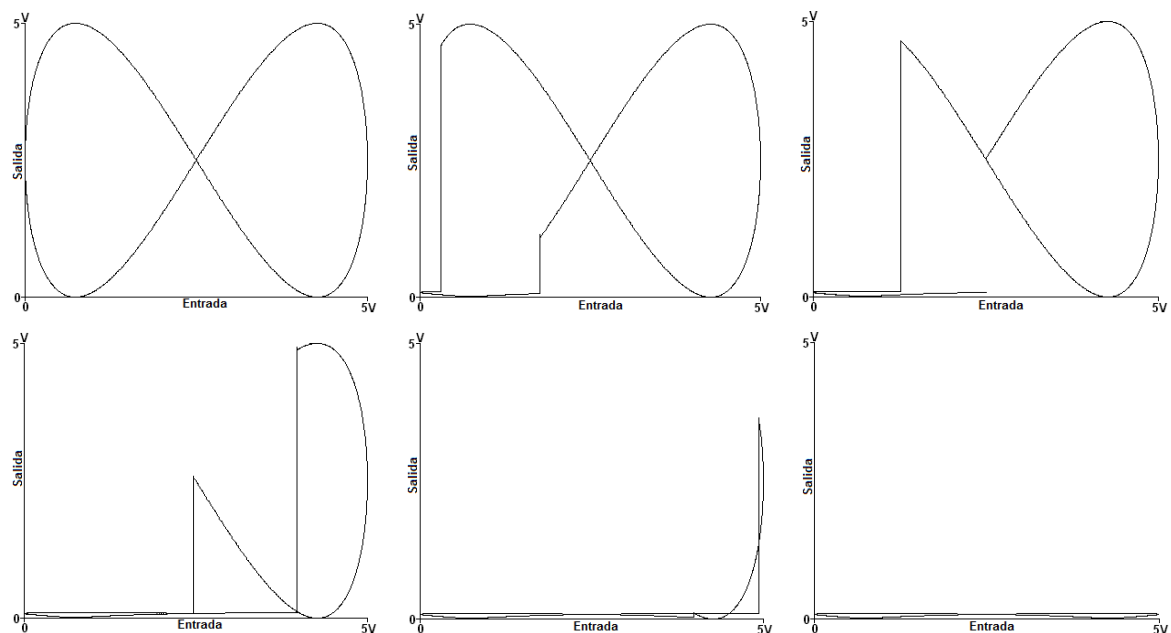


Figura 21. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del umbral para el segundo experimento.

En el tercer experimento se consideró como entrada una señal senoide amortiguada con frecuencia de 20Hz corrimiento de 5V y amplitud de 5V, con factor de amortiguamiento de 5. El umbral de la neurona se varió de 0 a 5V en 1 V y se fijó el retardo en 10ms. La amplitud de salida se mantuvo fija en 5V. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 22.

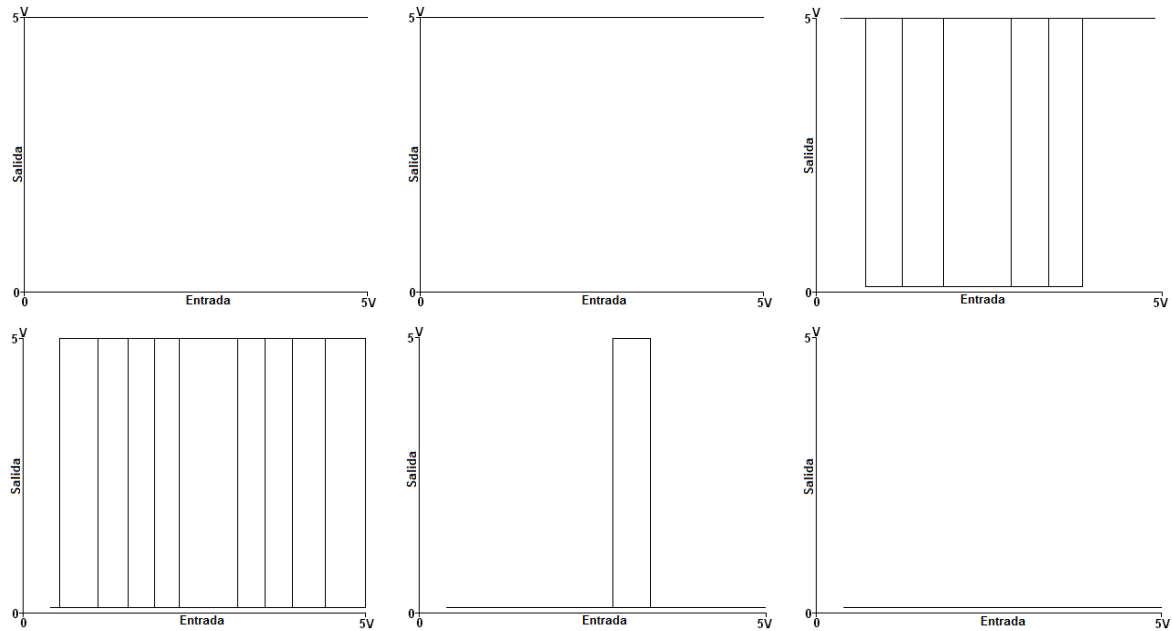


Figura 22. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del umbral para el tercer experimento.

En el este experimento la entrada fue una señal senoide amortiguada con frecuencia de 20Hz corrimiento de 5V y amplitud de 5V, con factor de amortiguamiento de 5. El umbral de la neurona se varió de 0 a 5V en 1 V y se fijó el retardo en 10ms. La amplitud de salida se moduló con una señal triangular de 20 Hz. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 23.

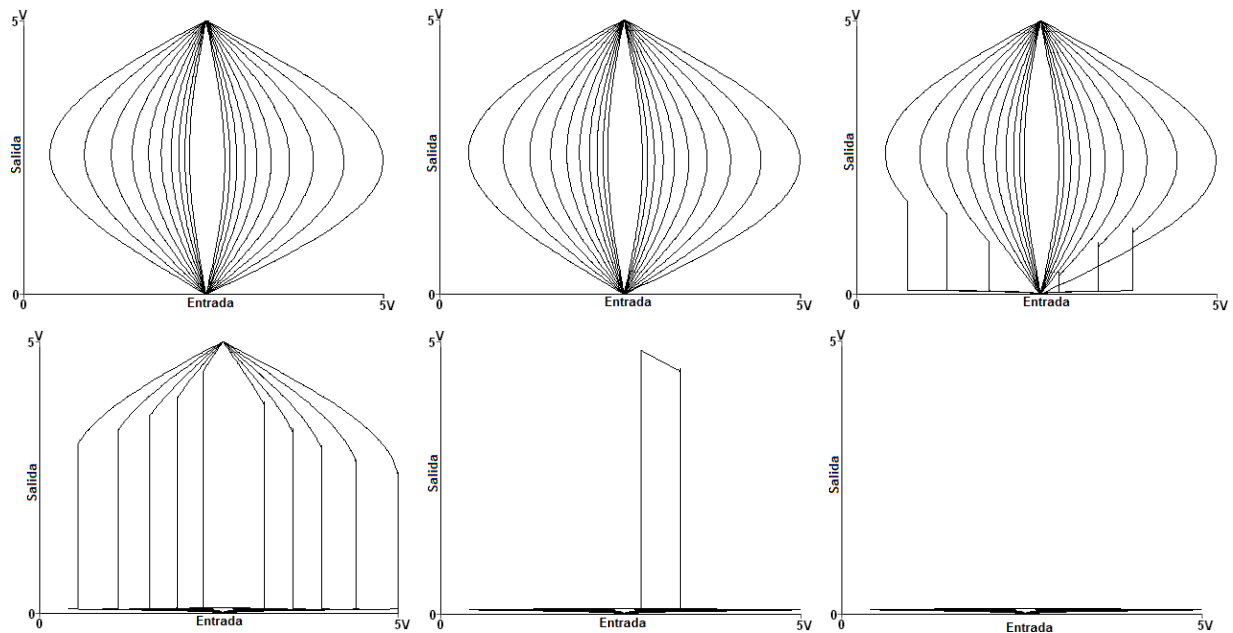


Figura 23. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del umbral para el cuarto experimento.

En el quinto experimento se consideró como entrada una señal senoide amortiguada con frecuencia de 20Hz corrimiento de 5V y amplitud de 5V, con factor de amortiguamiento de 5. El umbral de la neurona se varió de 0 a 5V en 1 V y se fijó el retardo en 10ms. La amplitud de salida se moduló con una señal senoide de 20 Hz, y 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 24. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona con umbral 1, y la última muestra el ciclo de histéresis para el máximo umbral analizado que fue de 5V.

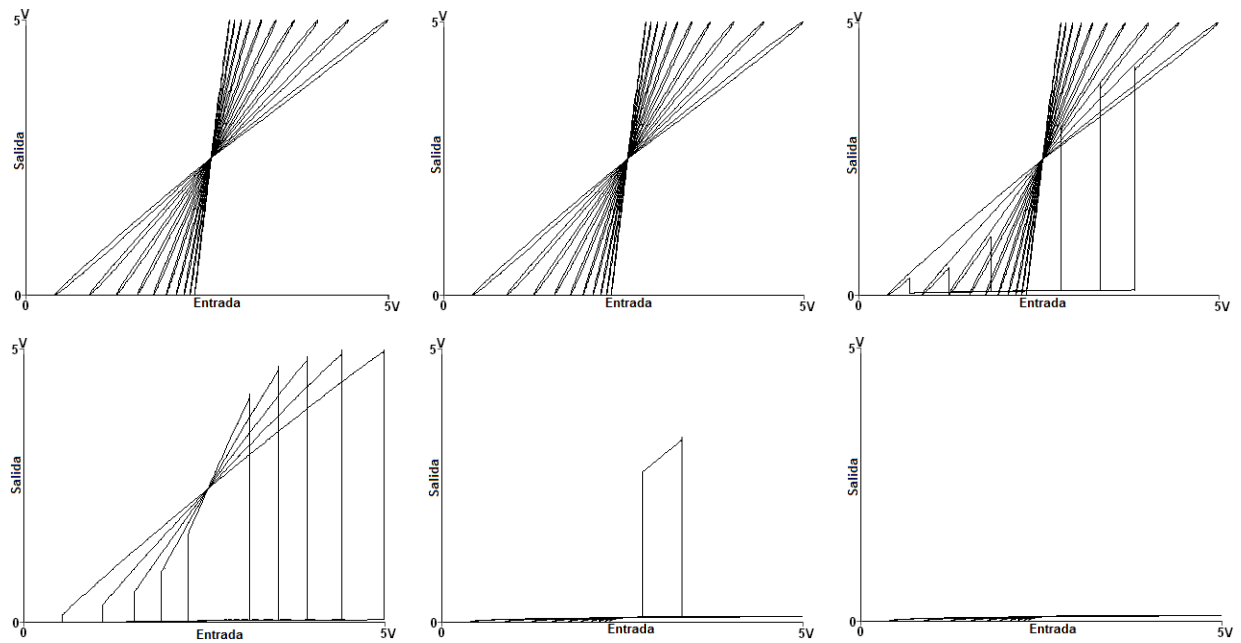


Figura 24. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con la variación del umbral para el quinto experimento.

7. Modulación por el retardo en neurona Mcculloky Pitts con inhibiciones

Hasta ahora hemos considerado a la neurona recibiendo sólo señal excitadora, pero vamos a estudiar que pasará en una neurona no integradora cuando también existen inhibiciones. Para esto el circuito electrónico de la neurona no integradora con señales inhibidoras se presenta en la figura 25. En nuestro estudio analizaremos los dos casos anteriores, tanto la variación del retardo como la del umbral.

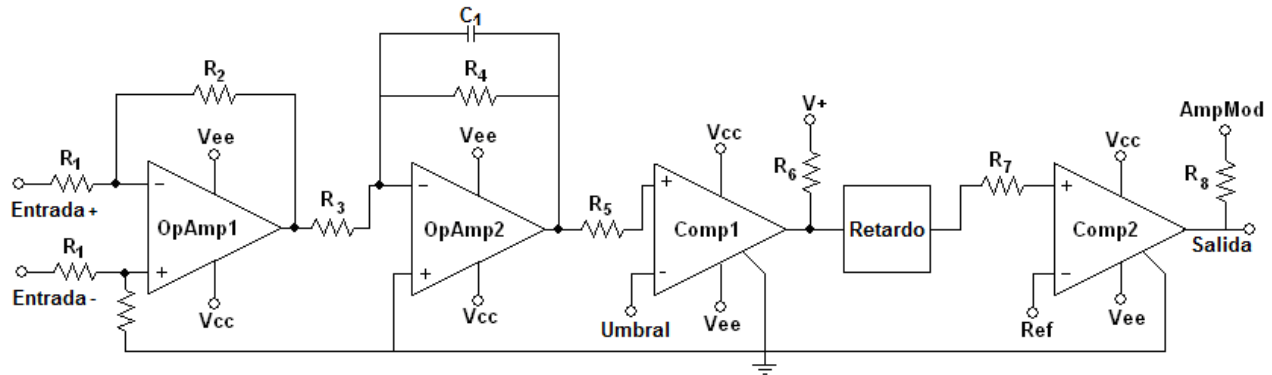


Figura 25. Esquemático de la neurona no integradora completa con entradas inhibidoras.

En este experimento se consideraron como entrada excitadora una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz, y como entrada inhibidora una señal senoide amortiguada con frecuencia de 20Hz corrimiento de 5V y amplitud de 5V, con factor de amortiguamiento de 5. El umbral de la neurona se fijó en 2V y se varió el retardo de 0 a 100ms de 20ms en 20ms. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 26. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona con retardo cero, y la última muestra el ciclo de histéresis para el máximo retardo analizado que fue de 10ms.

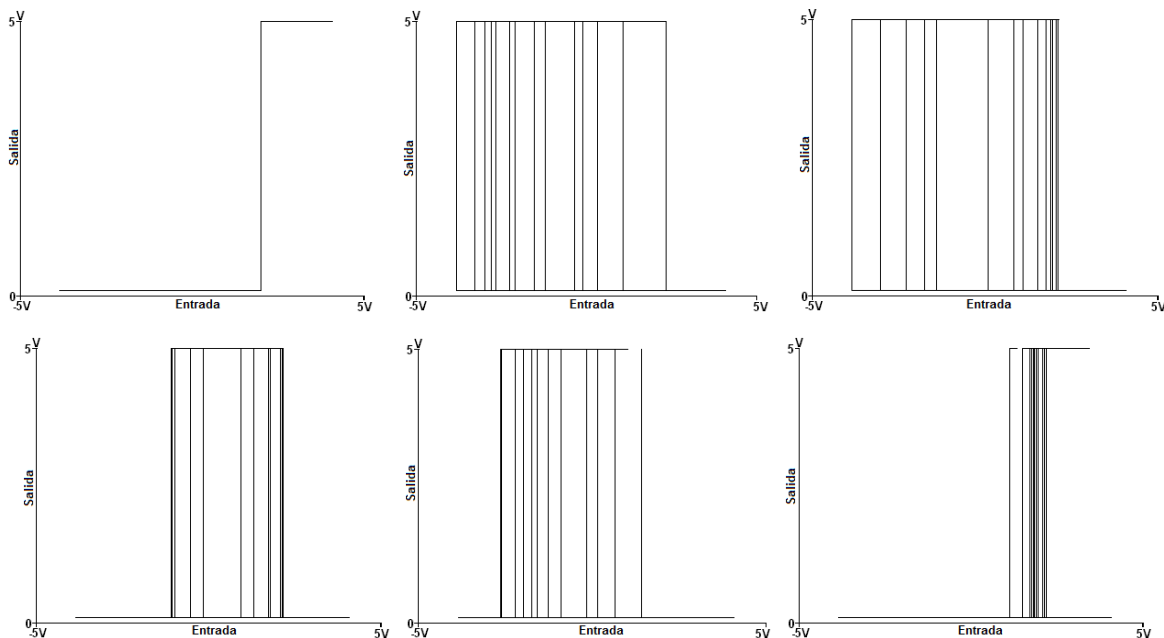


Figura 26. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con inhibición para la variación del retardo en el primer experimento.

En el siguiente experimento la entrada excitadora fue una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz y la entrada inhibidora una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 2 Hz. El umbral de la neurona se fijo en 2V y se varió el retardo de 0 a 100ms de 20ms en 20 ms. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 27.

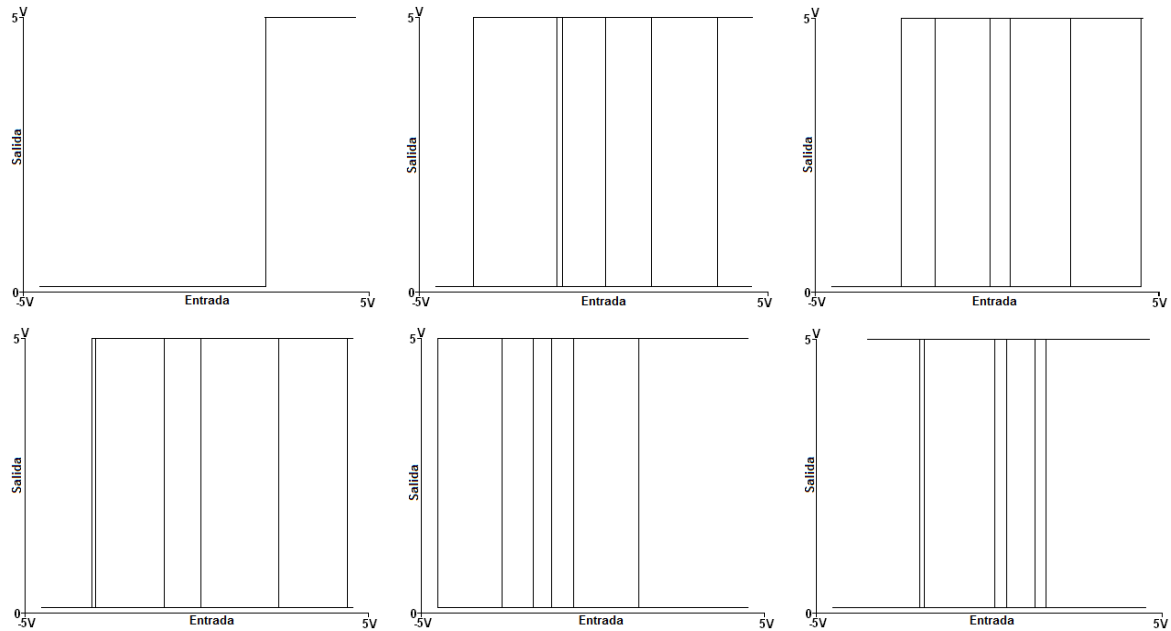


Figura 27. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con inhibición para la variación del retardo en el segundo experimento.

En este experimento la entrada excitadora fue una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz y la entrada inhibidora una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 2 Hz. El umbral de la neurona se fijo en 2V y se varió el retardo de 0 a 100ms de 20ms en 20 ms. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 28.

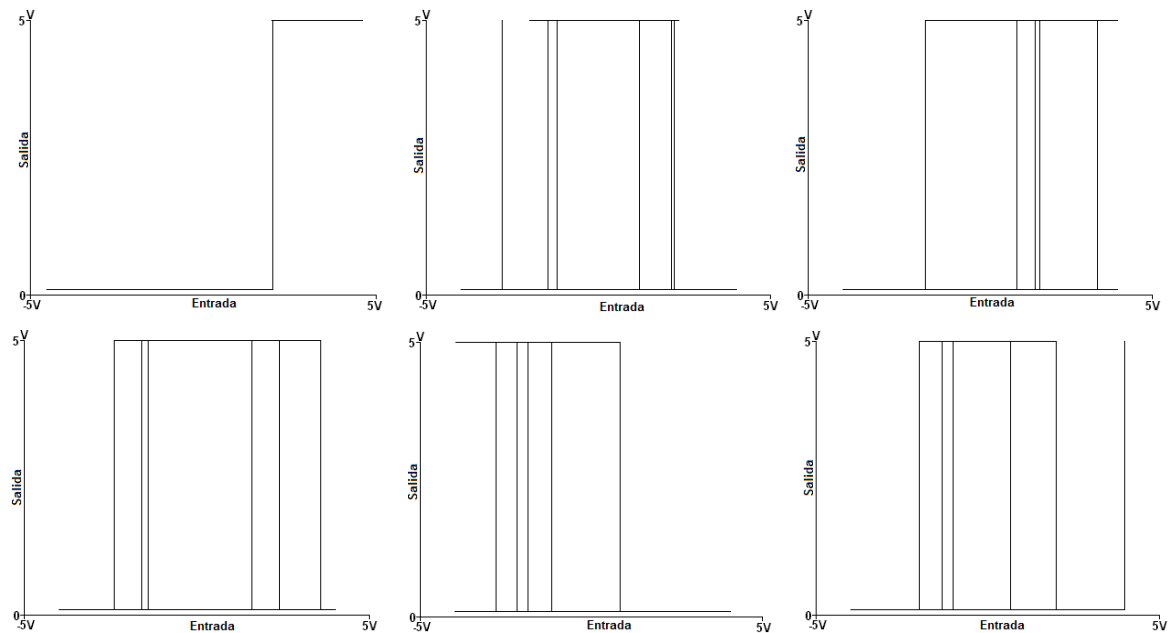


Figura 28. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con inhibición para la variación del retardo en el tercer experimento.

En el siguiente experimento la entrada excitadora fue una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz y como entrada inhibidora una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz. El umbral de la neurona se fijo en 2V y se varió el retardo de 0 a 100ms de 20ms en 20 ms. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 29.

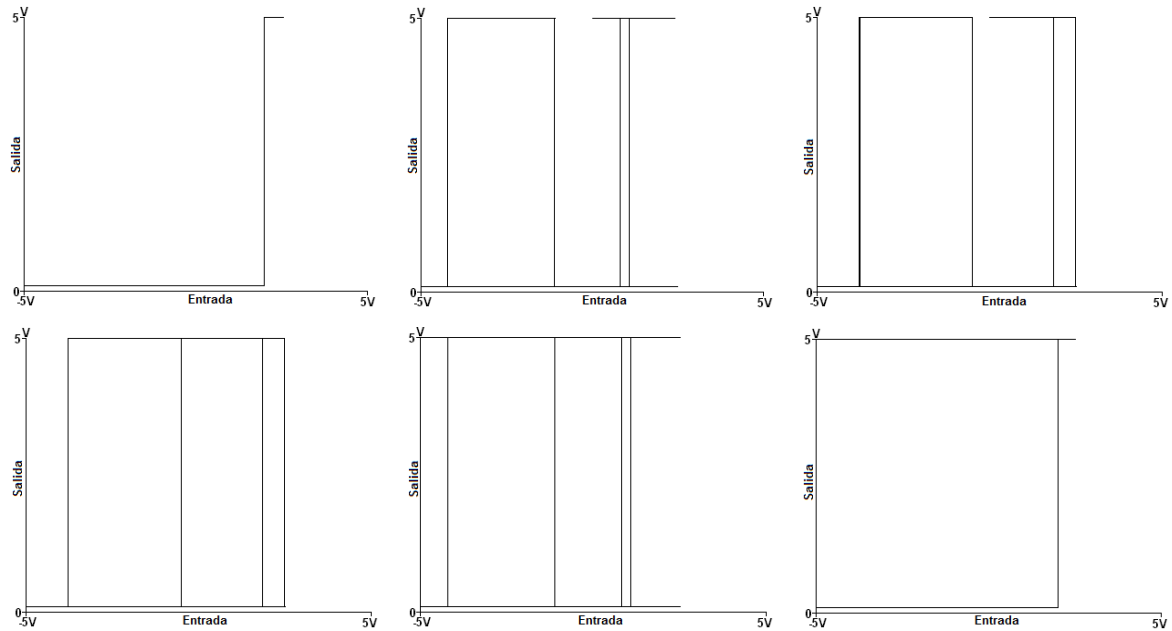


Figura 29. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con inhibición para la variación del retardo en el cuarto experimento.

En este experimento la entrada excitadora fue una señal cuadrada de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz y como entrada inhibidora una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz. El umbral de la neurona se fijo en 2V y se varió el retardo de 0 a 100ms de 20ms en 20 ms. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 30.

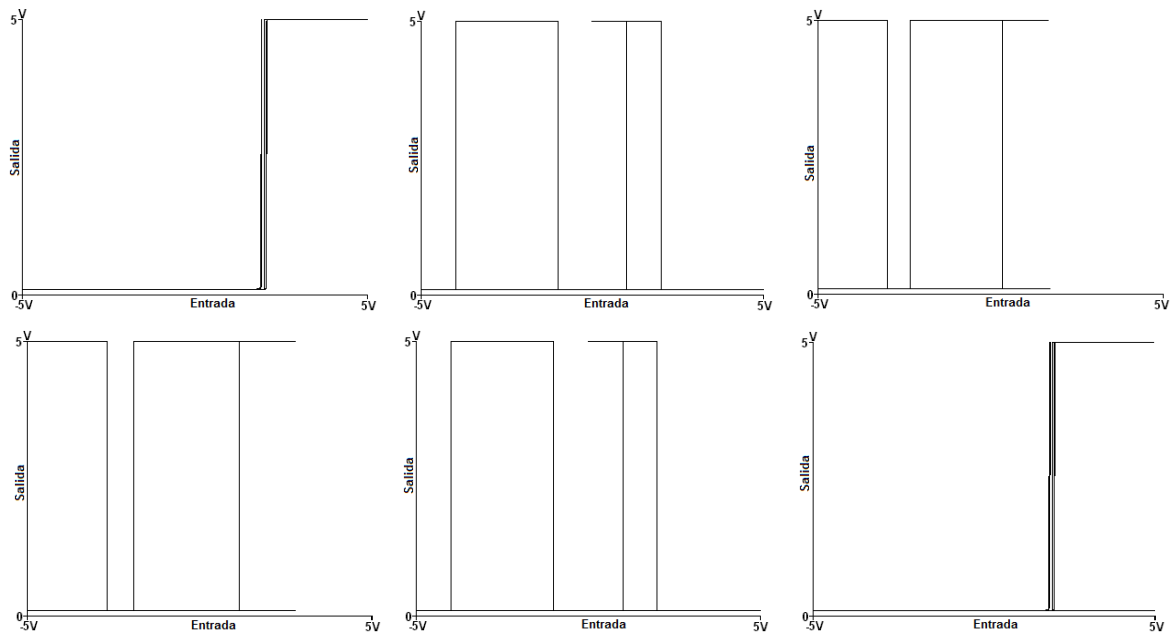


Figura 30. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con inhibición para la variación del retardo en el quinto experimento.

8. Modulación por el umbral en neurona McCulloch y Pitts con inhibiciones

En los siguientes experimentos analizaremos la modulación de la memoria a corto plazo como función del umbral de la neurona.

Es importante porque siendo la neurona una neurona McCulloch y Pitts, es una neurona con función de activación escalón también conocida como todo o nada, es decir que la neurona responde o no responde dependiendo de la amplitud de la señal de suma entre las entradas excitadoras e inhibidoras, dependiendo del valor del umbral, ya que si el valor de la amplitud de la suma es mayor que el valor del umbral dispara, pero si la suma no es mayor o igual al valor del umbral, no dispara.

En el primer experimento la entrada excitadora es una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz, y como entrada inhibidora una senoide amortiguada con frecuencia de 20Hz corrimiento de 5V y amplitud de 5V, con factor de amortiguamiento de 5. El retardo de la neurona se fijo en 10 ms y se varió el umbral de -2V a 3V de 1V en 1V. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona con umbral de -2V, y la última muestra el ciclo de histéresis para el umbral de 3V. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 31.

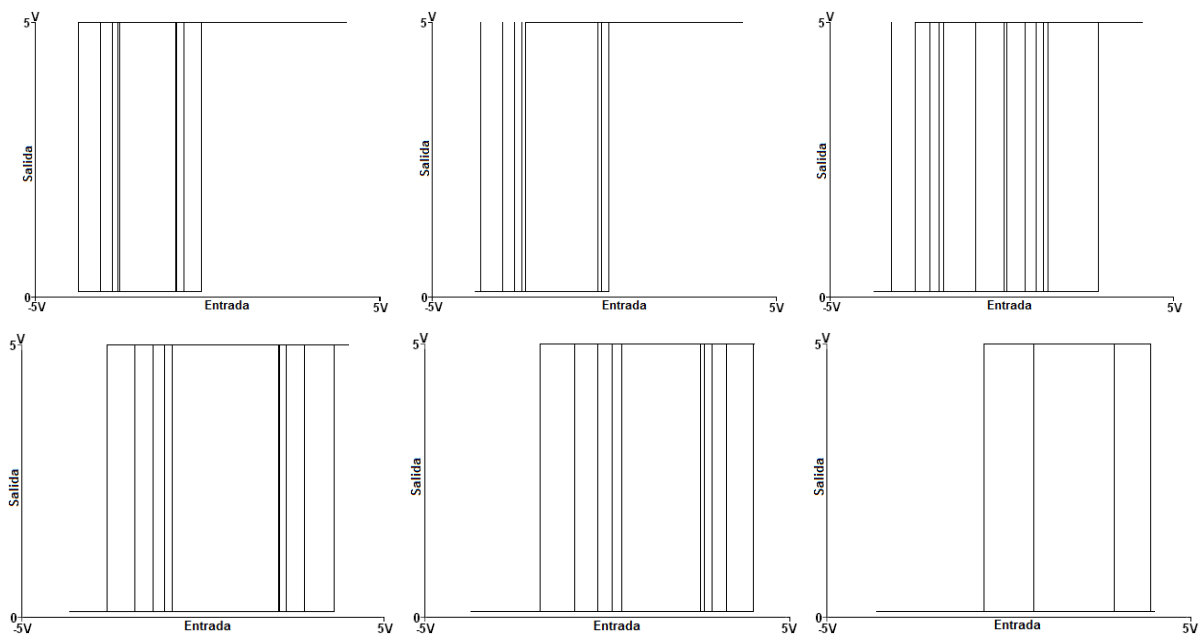


Figura 31. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con inhibición para la variación del umbral en el primer experimento.

En el primer experimento la entrada excitadora es una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz, y como entrada inhibidora una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 2 Hz. El retardo de la neurona se fijo en 10 ms y se varió el umbral de -2V a 3V de 1V en 1V. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona con umbral de -2V, y la última muestra el ciclo de histéresis para el umbral de 3V. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 32.

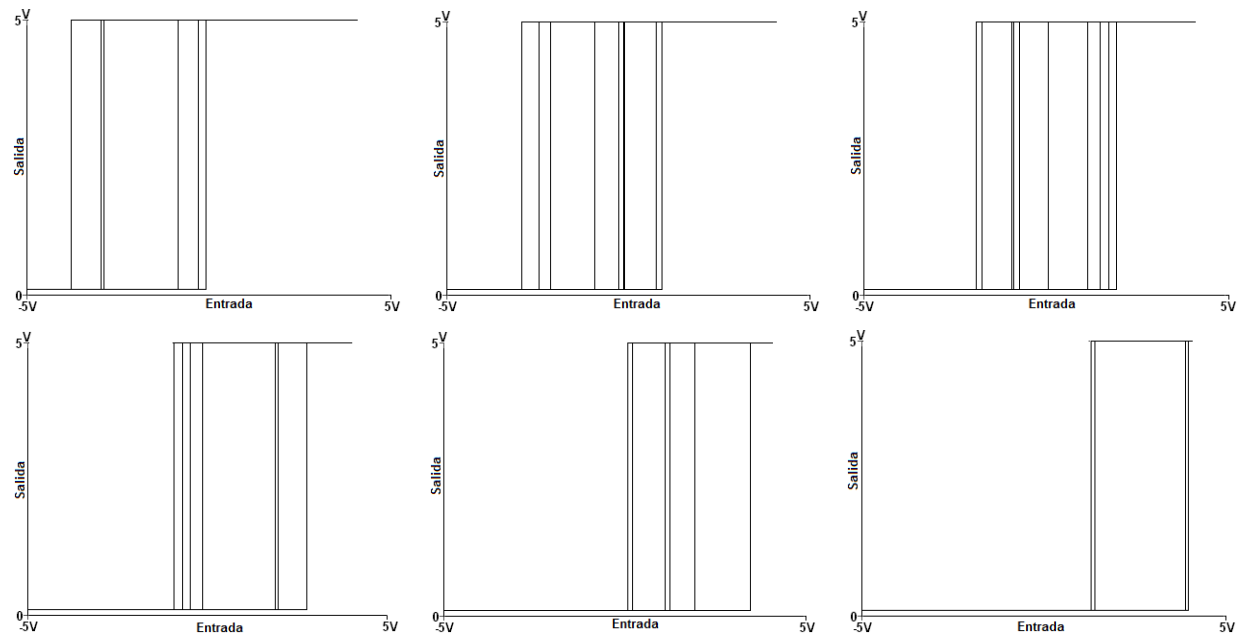


Figura 32. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con inhibición para la variación del umbral en el segundo experimento.

En el tercer experimento se consideraron como entrada excitadora una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz y como entrada inhibidora una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 2 Hz. El retardo de la neurona se fijó en 10 ms y se varió el umbral de de -2V a 3V de 1V en 1V. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 33. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona con umbral de -2V, y la última muestra el ciclo de histéresis para el umbral de 3V.

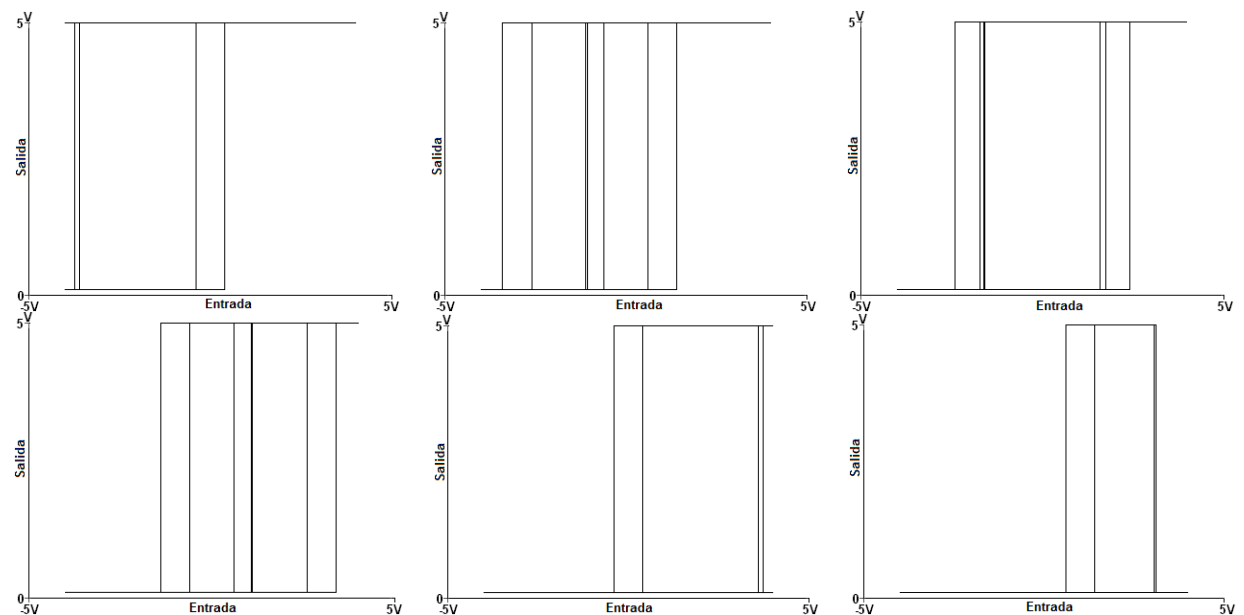


Figura 33. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con inhibición para la variación del umbral en el tercer experimento.

En el cuarto experimento la entrada excitadora es una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz y como entrada inhibidora una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz. El retardo de la neurona se fijo en 10 ms y se varió el umbral de -2V a 3V de 1V en 1V. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 34.

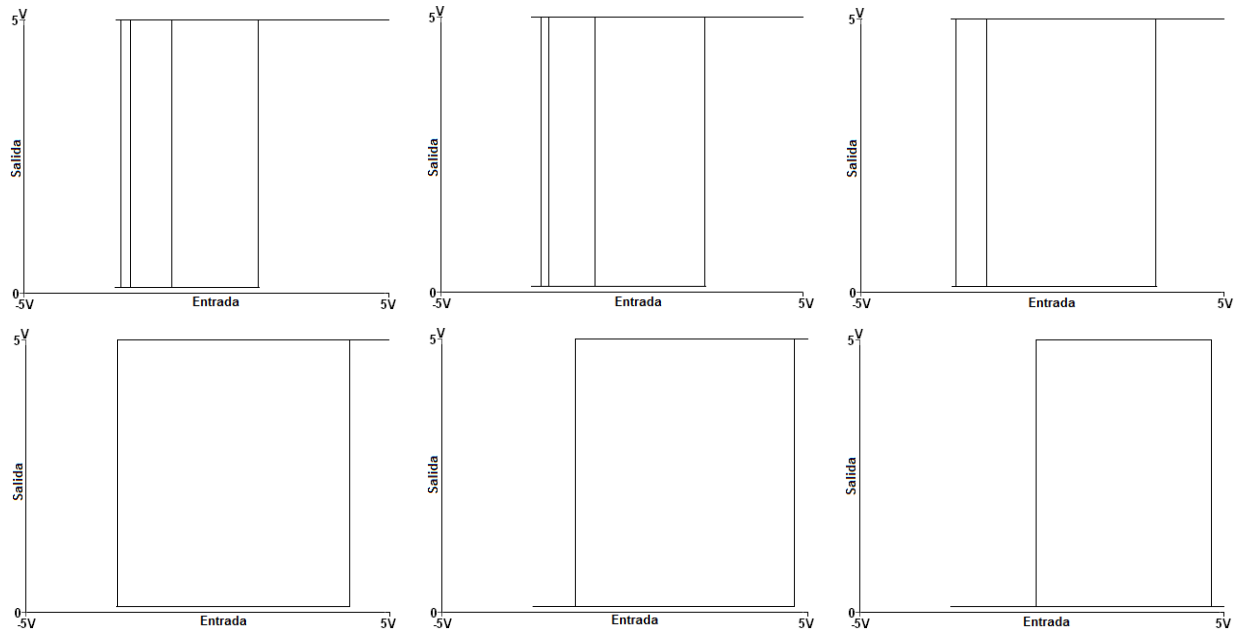


Figura 34. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con inhibición para la variación del umbral en el cuarto experimento.

En el quinto experimento se consideraron como entrada excitadora una señal cuadrada de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz y todos los demás parámetros se mantuvieron sin cambios. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 35.

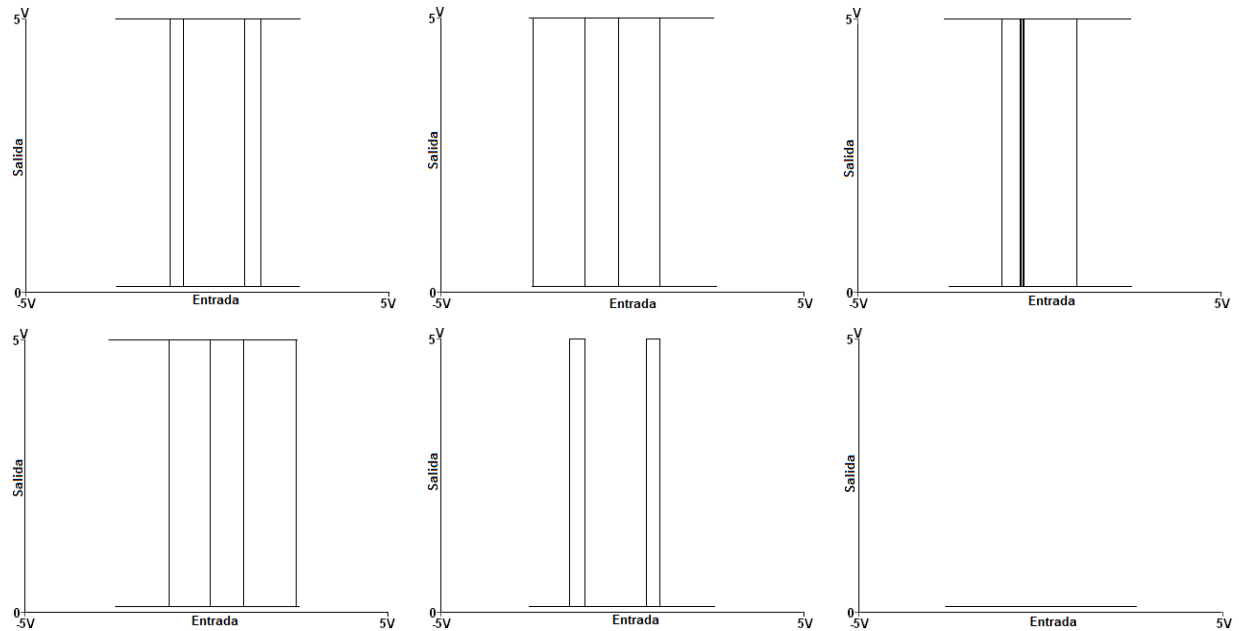


Figura 35. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con inhibición para la variación del umbral en el quinto experimento.

9. Modulación por el retardo en neurona integradora con inhibiciones

Hasta ahora hemos considerado sólo a la neurona tipo McCulloch y Pitts con inhibiciones en este estudio, pero vamos a considerar los mismos casos y experimentos en una neurona integradora con fugas cuando también existen inhibiciones. Para esto el circuito electrónico de la neurona no integradora con señales inhibidoras se presenta en la figura 36. En nuestro estudio analizaremos los dos casos anteriores, tanto la variación del retardo como la del umbral.

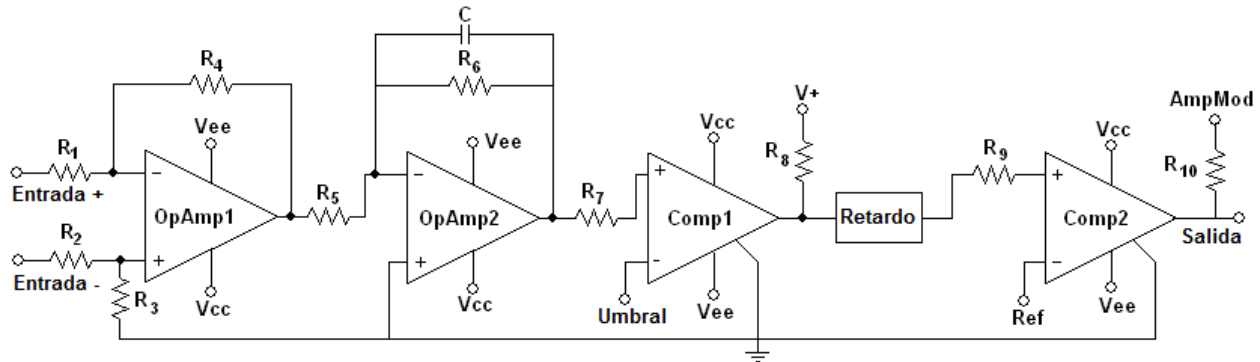


Figura 36. Esquemático de la neurona integradora con fugas completa con entradas inhibidoras.

En el primer experimento se consideraron como entrada excitadora una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz, y como entrada inhibidora una señal senoide amortiguada con frecuencia de 20Hz corrimiento de 5V y amplitud de 5V, con factor de amortiguamiento de 5. El umbral de la neurona se fijo en 2V y se varió el retardo de 0 a 100 ms de 20 ms en 20 ms. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 37. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona con retardo cero, y la última muestra el ciclo de histéresis para el máximo retardo analizado que fue de 10 ms.

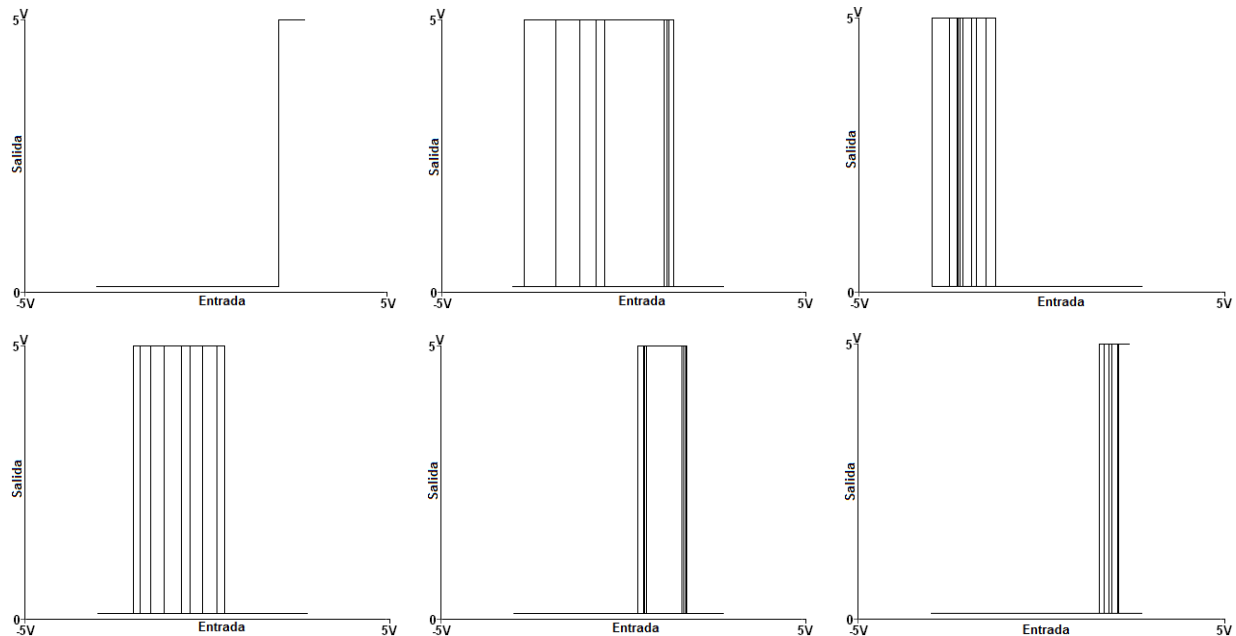


Figura 37. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con inhibición para la variación del retardo en el primer experimento.

En el segundo experimento la entrada excitadora es una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz y como entrada inhibidora una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 2 Hz. El umbral de la neurona se fijo en 2V y se varió el retardo de 0 a 100 ms de 20 ms en 20 ms. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 38.

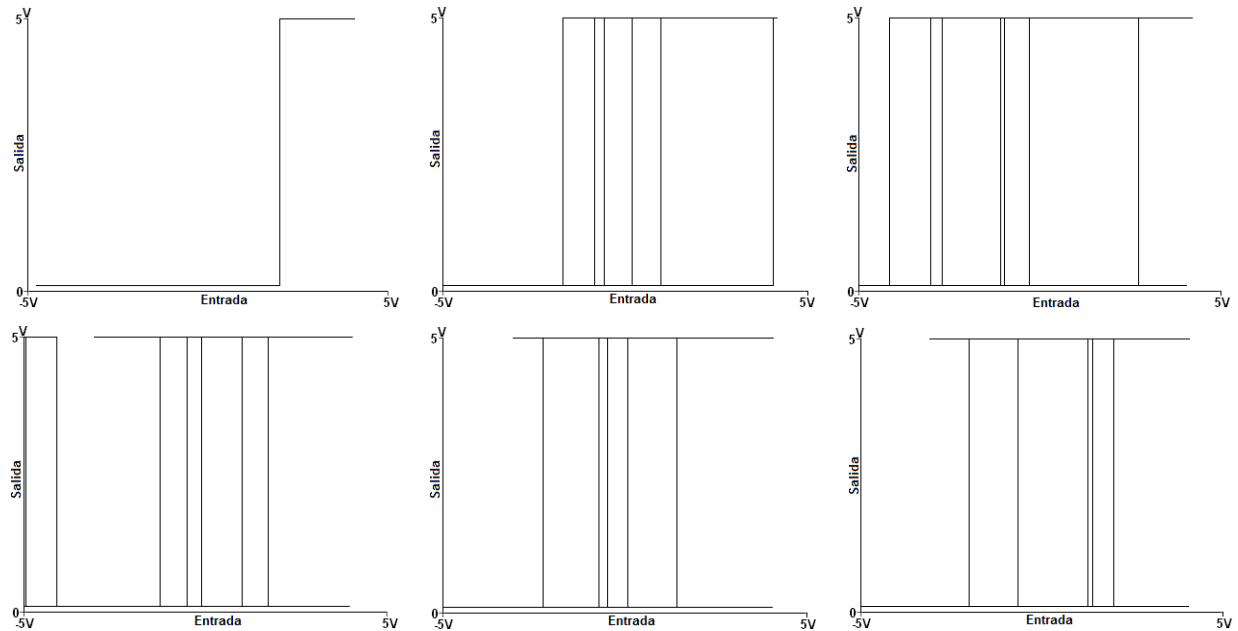


Figura 38. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con inhibición para la variación del retardo en el segundo experimento.

En el tercer experimento la entrada excitadora es una señal triangular de 5V de amplitud y todos los demás parámetros se mantienen sin cambio. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 39.

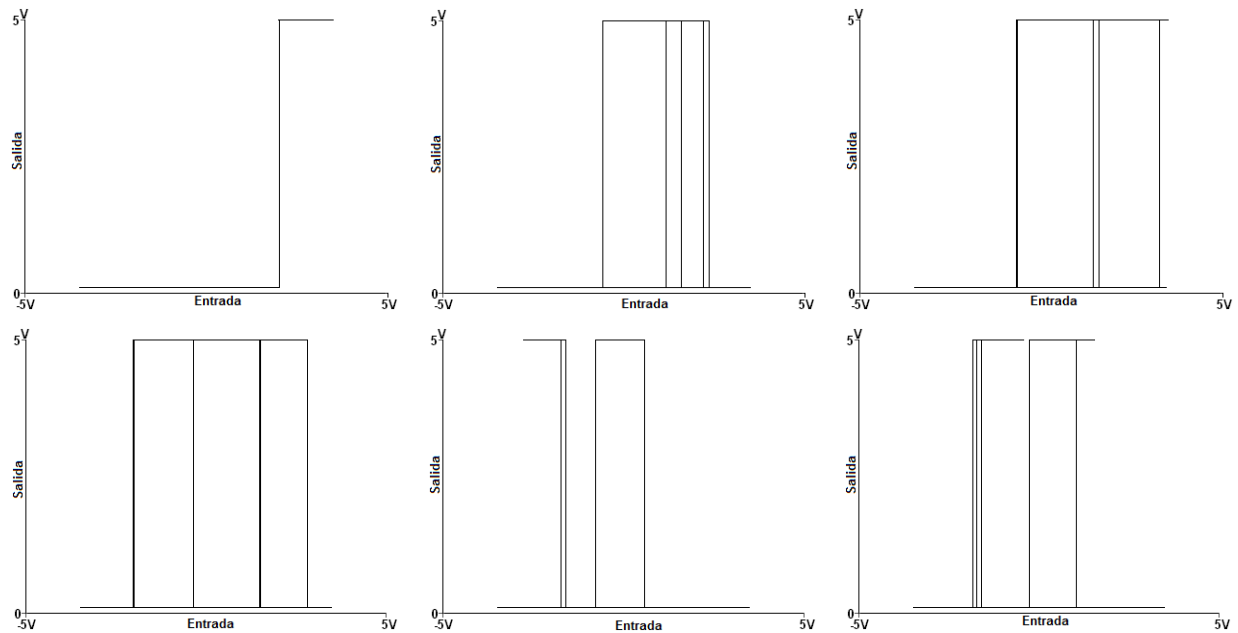


Figura 39. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona no integradora con inhibición para la variación del retardo en el tercer experimento.

En el cuarto experimento la entrada excitadora es una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz y como entrada inhibidora una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz. El umbral de la neurona se fijo en 2V y se varió el retardo de 0 a 100 ms de 20 ms en 20 ms. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 40.

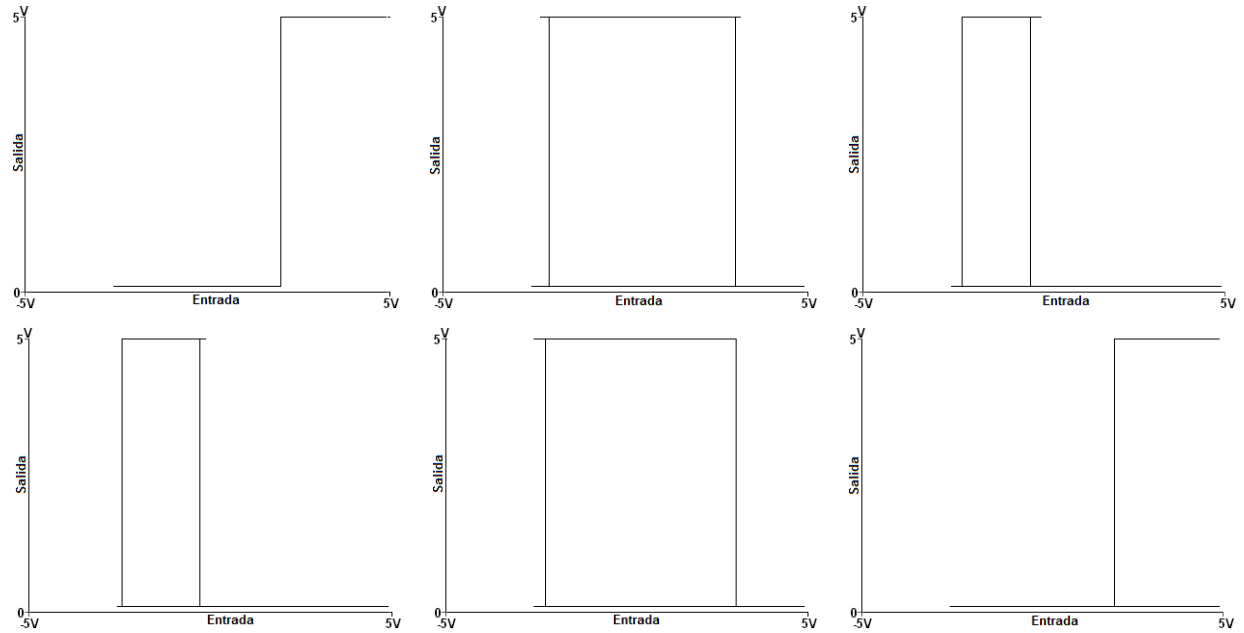


Figura 40. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con inhibición para la variación del retardo en el cuarto experimento.

En el quinto experimento se cambió la entrada excitadora es una señal cuadrada de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz y todos los demás parámetros se mantuvieron sin cambio. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 41.

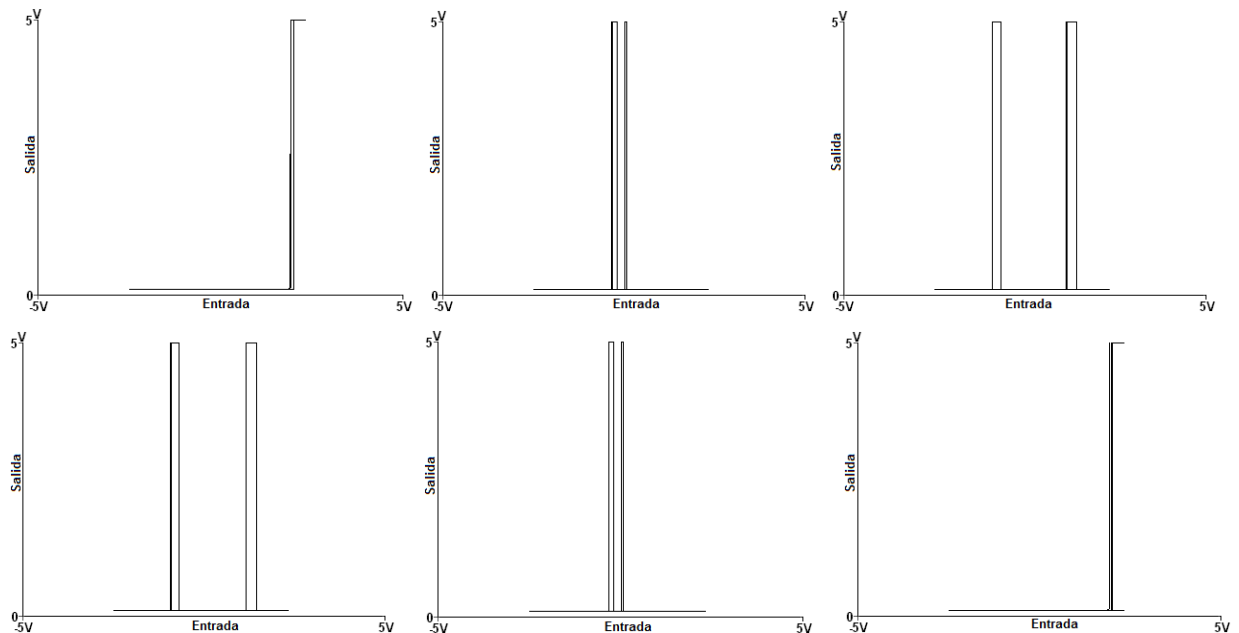


Figura 41. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con inhibición para la variación del retardo en el quinto experimento.

10. Modulación por el umbral en neurona integradora con inhibiciones

En los siguientes experimentos analizaremos la modulación de la memoria a corto plazo como función del umbral de la neurona.

Es importante porque aún siendo la neurona una neurona integradora, es una neurona con función de activación escalón también conocida como todo o nada, es decir que la neurona responde o no responde dependiendo de la amplitud de la señal de suma entre las entradas excitadoras e inhibidoras, dependiendo del valor del umbral, ya que si el valor de la amplitud de la suma es mayor que el valor del umbral dispara, pero si la suma no es mayor o igual al valor del umbral, no dispara.

En el primer experimento la entrada excitadora es una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz, y como entrada inhibidora una señal senoide amortiguada con frecuencia de 20Hz corrimiento de 5V y amplitud de 5V, con factor de amortiguamiento de 5. El retardo de la neurona se fijo en 10 ms y se varió el umbral de -2V a 3V de 1V en 1V. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 42. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona con umbral de -2V, y la última muestra el ciclo de histéresis para el umbral de 3V.

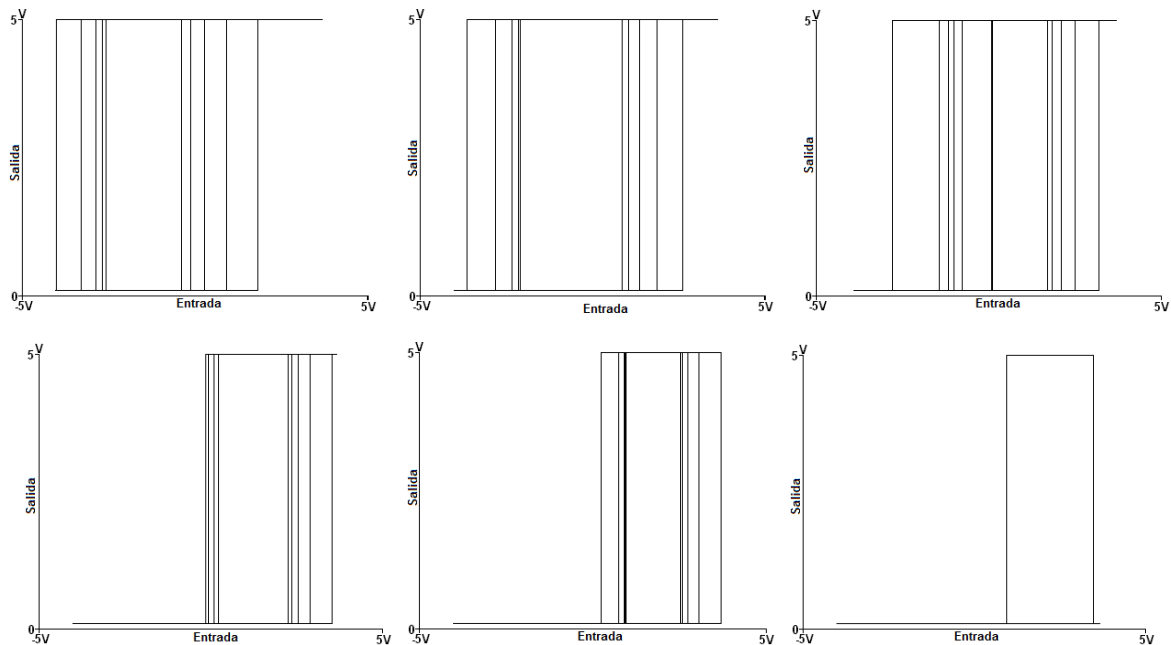


Figura 42. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con inhibición para la variación del umbral en el primer experimento.

En el segundo experimento se consideraron como entrada excitadora una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz y como entrada inhibidora una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 2 Hz. El retardo de la neurona se fijo en 10 ms y se varió el umbral de -2V a 3V de 1V en 1V. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 43. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona con umbral de -2V, y la última muestra el ciclo de histéresis para el umbral de 3V.

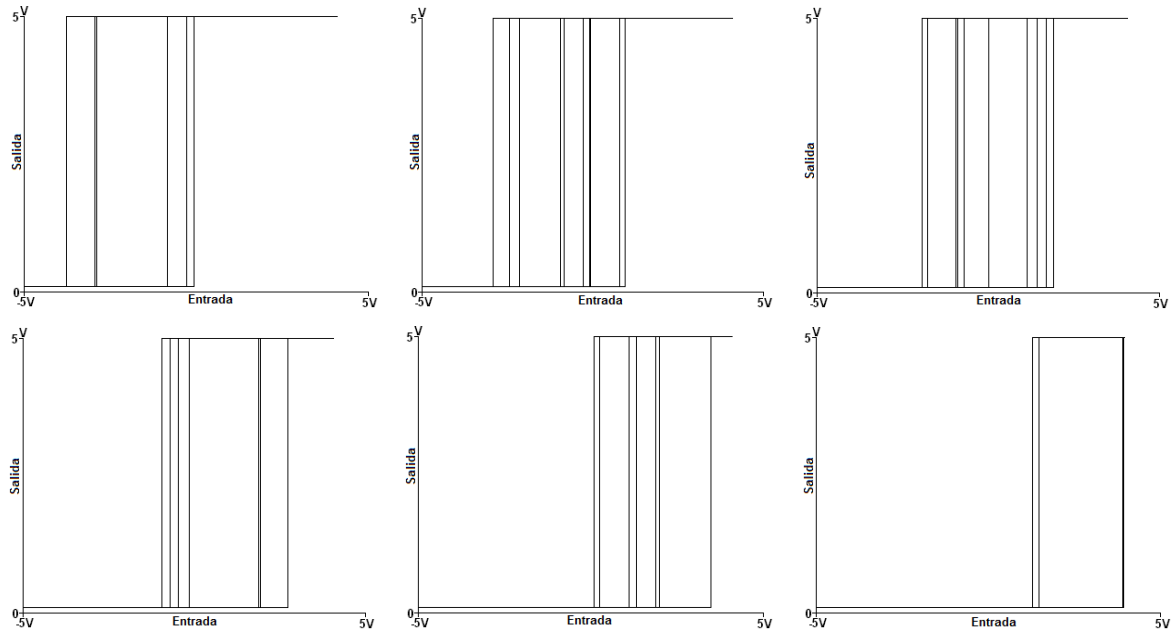


Figura 43. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con inhibición para la variación del umbral en el segundo experimento.

En el tercer experimento se consideraron como entrada excitadora una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz y como entrada inhibidora una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 2 Hz. El retardo de la neurona se fijo en 10 ms y se varió el umbral de de -2V a 3V de 1V en 1V. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 44. La primera gráfica nos muestra el estado la neurona con umbral de -2V, y la última muestra el ciclo de histéresis para el umbral de 3V.

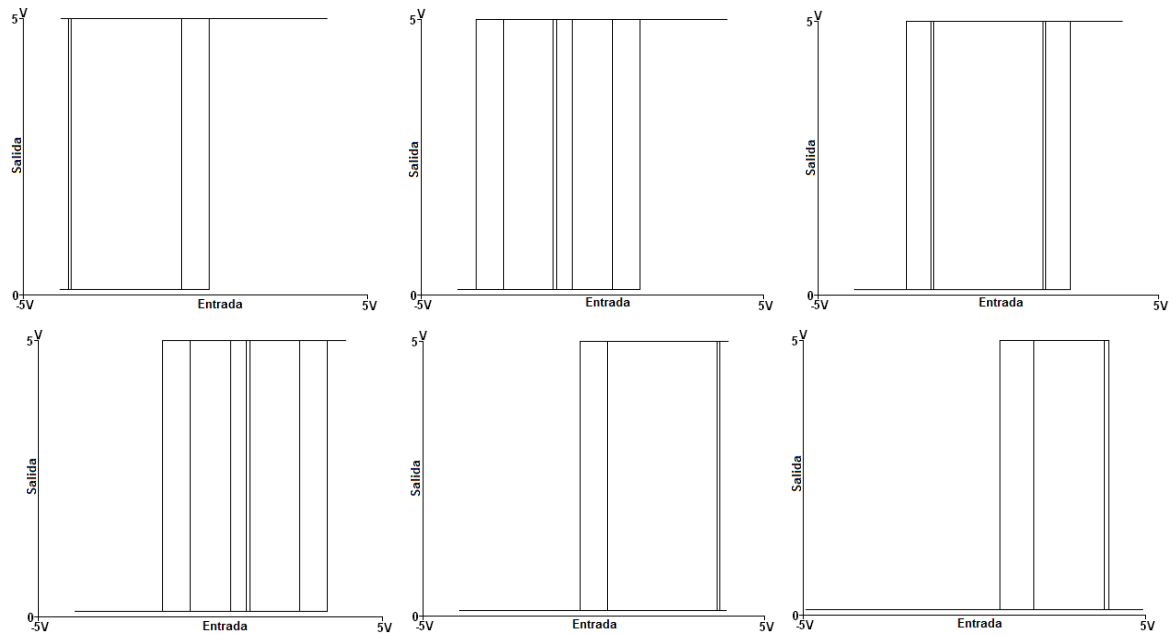


Figura 44. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con inhibición para la variación del umbral en el tercer experimento.

En el cuarto experimento la entrada excitadora es una señal triangular de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz y como entrada inhibidora una señal senoide de 5V de amplitud y frecuencia de 10 Hz. El umbral de la neurona se fijo en 2V y se varió el retardo de 0 a 100ms de 20ms en 20 ms. La amplitud de salida se fijó en 5V de amplitud. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 45.

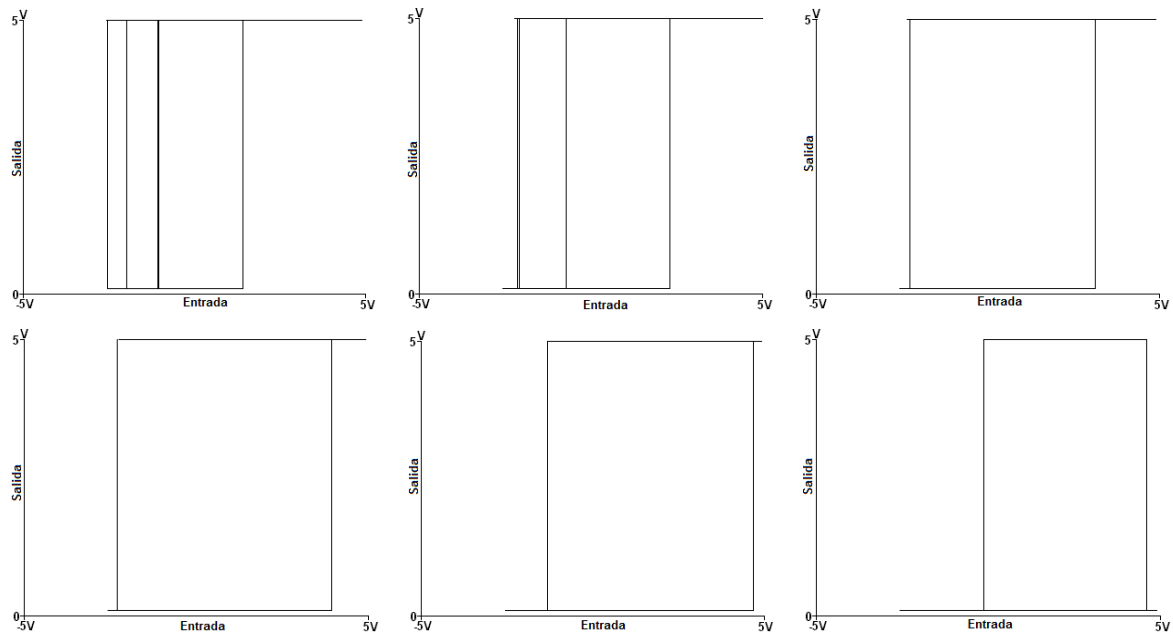


Figura 45. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con inhibición para la variación del umbral en el cuarto experimento.

En el quinto experimento se cambió la entrada excitadora a una señal cuadrada de 5V de amplitud y frecuencia de 20 Hz y los demás parámetros permanecieron iguales. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 46.

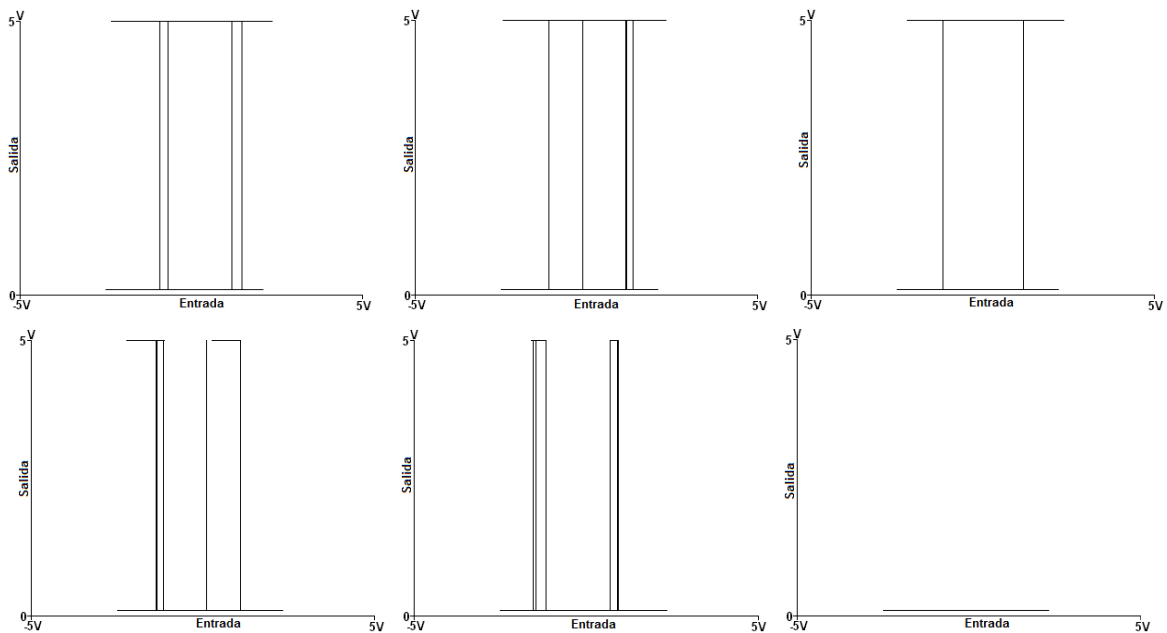


Figura 46. Resultados de la modulación del ciclo de histéresis del modelo de neurona integradora con inhibición para la variación del umbral en el quinto experimento.

Conclusiones

En este trabajo hemos mostrado que las propiedades que presenta nuestro modelo de neurona pueden ser extendidas al adicionar a la neurona un retardo axonal, que puede modular el efecto de memoria a corto plazo. Si bien, el fenómeno de memoria que exhibe la neurona es sencillo, por otro lado, dicho fenómeno puede ser modulado, tanto con los parámetros neuronales como el umbral y la amplitud de respuesta, como con las características de la señal externa. Esta versatilidad le confiere a nuestro modelo una gran ventaja como bloque electrónico básico para la construcción de circuitos neuronales pequeños. Estos circuitos electrónicos se pueden diseñar para que muestren propiedades globales que no pueden ser alcanzadas en la neurona aislada.

Referencias Bibliográficas

Cragg B. C. and Temperley H. N. V., (1955). **Brain** 78, p. 304 - 316,

Guigon E. and Burnod Y., **The handbook of brain theory and neural networks**, "Short-term memory".

Mc Culloch W.S., Pitts W.A. (1943). A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. **Bull. Math. Biophys.** 5. p. 115-133.

Pérez J., Herrera A., Bañuelos M., Quintana S., Castillo J., Padrón A., Garces A. Electronics implementation of a neuron model with parabolic burst response **Memorias XV Congreso Nacional de Instrumentación** p.385-392,