

2046

DESCARTE

Universidad Nacional Autónoma de México
FACULTAD DE INGENIERIA

**MODELO ELECTRONICO DE UN
SISTEMA NEURONAL**

REPORTE DE SEMINARIO
que para obtener el título de:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

p r e s e n t a n :
C. ROLANDO LARA Y ZAVALA
SERGIO DOMINGUEZ VILLALPANDO
ARTURO LEON ROMANOS

DIRECTORES DEL SEMINARIO
Maestra Gertrudis Kurz de Lara
y Dr. Ricardo Tapia



MEXICO, D. F.

1974



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

MODELO ELECTRONICO DE
UN SISTEMA NEURONAL



C. ROLANDO LARA Y ZAVALA
SERGIO DOMINGUEZ VILLALPANDO
ARTURO LEON ROMANOS

MEXICO

1974

A LOS MAESTROS DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA.

1955

A LOS COMPAÑEROS
Y AMIGOS.

A RICARDO.

A LA MAESTRA:
GERTRUDIS KURZ DE LARA.

INDICE

	Pag.
INTRODUCCION.	I
CAPITULO I. Teoría de Modelado.	3 3
CAPITULO II. Conceptos Generales sobre la Sinápsis Neuronal.	8 8
CAPITULO III. Implementación Electrónica de la Neurona.	26 26
CAPITULO IV. Lógica Neuronal.	61 61
CAPITULO V. Experimentos con el Conjunto Neuronal.	76 76
CAPITULO VI. Modelo del Sistema Neuro- motor.	83 83
CONCLUSION.	94
BIBLIOGRAFIA.	97

PROLOGO

Este trabajo ha sido realizado gracias al estímulo y cooperación constante del Dr. Ricardo Tapia y de la Maestra Gertrudiz Kurz de Lara.

También deseamos agradecer a Luis Lyons y José - Luis Herrera su valiosa colaboración así como la - ayuda prestada por Hernán Lara, Victoria Martí - nez, Jorge Lascano, Justino Guzmán y Alfredo - Saracho y esposa para la colaboración del mismo.

INTRODUCCION

En principio el conocimiento en el hombre surge por la necesidad de enfrentarse a la naturaleza y sus fuerzas en la lucha por la subsistencia, posteriormente el ser humano siente la necesidad de formar grupos por su incapacidad de realizar diferentes actividades en forma simultánea, creándose por esto sistemas sociales fundamentados en la división del trabajo. Con el tiempo dichos sistemas al desarrollarse de acuerdo al proceso histórico propician esa especialización en forma más intensa, aumentando su fuerza por la introducción de la técnica después de la Revolución Industrial alcanzando dicha especialización su punto crítico en el Siglo XX, donde la idea de la unidad de las ciencias de los Griegos se ha olvidado por completo y donde el individuo ha perdido la visión del todo por la necesidad social de dominar su especialidad.

Este trabajo tiene como principal finalidad la de mostrar la necesidad y la utilidad de re-integrar nuevamente a las ciencias en el proceso de la investigación para recuperar la visión general del fenómeno que se estudia y observarlo con sus diferentes manifestaciones, siempre como una unidad.

En forma particular la idea de este trabajo surgió, por el interés creciente que se ha manifestado en las ramas ingenieriles por los estudios biológicos, en general por la relación entre el mundo orgánico y el inorgánico, y por la necesidad de la aplicación de las ciencias exactas sobre los fenómenos relacionados con la vida.

En base a lo anterior el laboratorio de Neuro-Bioquímica de la U.N.A.M., aceptó en forma entusiasta la idea de un trabajo inter-disciplinario fundamentado en las investigaciones realizadas por ese centro sobre los fenómenos sinápticos en sistema nervioso

estudios que originaron una hipótesis sobre el funcionamiento del sistema neuro-motor, que es desarrollada a través de un modelo que lo representa, modelo que al poder ser simulado por medios electrónicos presenta grandes ventajas por los siguientes puntos -- principalmente:

- a) La hipótesis puede ser confirmada al crearse un modelo de las características generales del sistema en estudio.
- b) La posibilidad de aislar las diferentes variables dentro del sistema y observar el efecto que cada una produce en forma independiente.
- c) Como elemento de enseñanza que muestre los principios en que se fundamenta la actividad de la moto-neurona en el sistema Nervioso.
- d) Aplicaciones tecnológicas, fundamentadas en los principios generales simulados.

Por esto se procedió a la realización del trabajo, que se divide en dos partes. La 1a. se refiere a las propiedades Biológicas fundamentales del sistema Nervioso necesarias para la comprensión del modelo, y la 2a. la implementación electrónica de éste.

CAPITULO I

TEORIA DEL MODELADO

Entre los métodos de investigación sobre el sistema nervioso, se ha desarrollado intensamente el que se refiere a la realización de modelos, método que busca de diferentes maneras (de acuerdo a la disciplina de que se trate), reproducir los diferentes fenómenos que determinan el funcionamiento neuronal. Para la reproducción, es necesario en primer término, la definición clara del fenómeno que se quiere simular tomando en consideración que por la complejidad del sistema nervioso, ningún modelo puede realizar todas sus propiedades, pero sí puede ser útil para ayudar a entender algunas de ellas previamente especificadas, pudiéndose por ello definir, cuáles son las diferencias entre el original y modelo.

METODO:

El principal problema que plantea el estudio del sistema nervioso para el investigador, es la obtención de datos lo suficientemente exactos, esta dificultad se debe a la variación de la respuesta de un sistema neuronal ante una misma entrada, dependiendo dicha respuesta no sólo del último estímulo, sino también de la señal recibida anteriormente añadido a la gran cantidad de interrelaciones que existen entre diferentes zonas del mismo; estas circunstancias, colocan al investigador frente a un número muy grande de datos, de los cuales tiene que definir lo más claramente posible las características fundamentales del fenómeno que estudia, diferenciando cuáles de ellas son de mayor importancia y cuáles pueden ser eliminadas para la simplificación de su estudio y para la realización del modelo.

Un modelo para que sea considerado como tal, debe cumplir con los siguientes requisitos:

- 1) que le permitan definir claramente el fenómeno que investiga.
- 2) esclarecer y comprobar hipótesis postuladas por la investigación.
- 3) plantear nuevas hipótesis, que sirvan como estímulo para su comprobación en la realidad.
- 4) capacidad de aislar las variables fundamentales y observar el efecto que produce su variación sobre el sistema.
- 5) la propiedad que el modelo dé resultados reproducibles.

Una vez que se han definido claramente las características fundamentales del sistema que se estudia, generalmente se siguen dos criterios para la realización del modelo:

- 1) Por hipótesis a priori de funcionamiento, postulando la existencia de mecanismos que no se han comprobado en la realidad pero que permiten interpretar ciertos fenómenos observados. (p. ej. Bomba de Hodgkins-Huxley).
- 2) Por método de entrada-salida o de "caja negra", donde en función de la respuesta del sistema a un estímulo dado, se deducen características generales del funcionamiento del mismo.

Todo sistema puede representarse por un gran número de cajas negras, cada una es válida sólo si reproduce resultados esenciales encontrados hasta la fecha en experimentos de tipo entrada-salida, pero es tanto más útil, cuanto más permite la posibilidad de

predecir fenómenos que pueden comprobarse o rechazarse por el experimento o la observación directa.

TIPOS DE MODELOS NEURONALES:

Existen tres tipos fundamentales de modelados de sistemas neuronales:

- 1) Modelación de una unidad neuronal en función a los datos observados y conocidos; y por las diversas combinaciones de dichas unidades; se simulan diferentes sistemas completos.
- 2) Modelación de un sistema o un grupo de sistemas, en función a una hipótesis establecida de funcionamiento, donde las características de las unidades neuronales, dependen exclusivamente de ésta función general del sistema.
- 3) Modelación no neuronal: donde se busca encontrar los mecanismos o funcionamiento global de un sistema, independientemente de las unidades que lo forman siendo estudiado dicho sistema como una unidad con características generales - específicas, de donde parte el fundamento para la realización del modelo.

TIPOS DE MODELOS EN DIFERENTES DISCIPLINAS:

Los tres tipos de modelos anteriores, pueden simularse de diferentes maneras de acuerdo a la disciplina que los realice, encontrándonos actualmente cuatro tipos fundamentalmente:

1) Matemático:

La modelación matemática, permite predecir el comportamiento de una unidad o la combinación de un conjunto de unidades a través de elementos matemáticos en función de una entrada específica; sin embargo tiene la gran limitación, que el número de variables debe ser razonablemente pequeño y las no linealidades del sistema no deben --

presentar problemas analíticos muy complejos, ya que no se cuenta actualmente con las suficientes herramientas matemáticas que puedan manejar fácilmente dichas variables no lineales.

Con el advenimiento de las computadoras, ha sido posible eliminar parte de éstas limitaciones; sobre todo en lo que respecta al número de variables, su grado de interacción y su carácter no-lineal.

En lo que se refiere a grupos neuronales del segundo y tercer tipo especificados arriba, la matemática a través de la estadística no solamente permite una descripción del comportamiento global de sistemas complejos, sino la posibilidad de obtener predicciones comprobables en los mismos.

En los grupos no neuronales, la matemática nos permite plantear hipótesis numéricas en función de la cantidad de información que es capaz de procesar el sistema nervioso y su variación o comparación con otros sistemas menos desarrollados, que nos permite encontrar tendencias generales de los fenómenos evolutivos y formar conceptos más claros del fenómeno humano dentro del contexto de la naturaleza. Este tipo de modelación está apenas en sus albores, pero plantea problemas muy interesantes, que pueden ser muy útiles para la investigación.

2) Modelos Iónicos:

Son difíciles a realizar, pero tienen la ventaja de trabajar con variables no lineales y en tiempo real. Buscan reproducir los fenómenos a través de elementos equivalentes.

3) Modelos Electrónicos:

Los modelos electrónicos en cambio, tienen la ventaja de facilitar la experimentación, por el hecho que permite introducir las complicaciones gradualmente y por el hecho que pueden llegar a resultados fácilmente reproducibles. Como el material usado en éstos modelos es básicamente diferente al del original, éste tiene limitaciones esenciales, que no pueden eliminarse solamente por el aumento del número de partes.

4) Modelación por Computadora:

La computadora no solamente permite mejorar como se había mencionado, los modelos matemáticos, sino que puede ser de gran utilidad en combinación con modelos físicos acoplados a ella, lo que permite delegar a la computadora las funciones cuya realización en el modelo pudieran implicar demasiada dificultad, o un costo exagerado.

Todos los métodos de modelado estudiados, deben ser utilizados de acuerdo a los objetivos del investigador. No son los únicos métodos posibles, pero son los que más se han desarrollado actualmente.

CAPITULO II

I. - Conceptos Generales sobre la Sinápsis Neuronal.

Con objeto de que el modelo de la neuro-motora estudiada pueda comprenderse claramente, es necesario definir algunos conceptos importantes sobre la Sinápsis Neuronal y sobre las características fundamentales de la neurona.

En general las funciones de la neurona en el sistema nervioso pueden reducirse a dos:

La primera, actuando como elemento de enlace y transmisión; en general la neurona es sensible a los diversos parámetros de una señal de información como son: la amplitud, la duración, la frecuencia y la fase. Cuando dicha señal alcanza cierto nivel de umbral, la neurona responde con una señal únicamente variable en su frecuencia, mientras que la duración y amplitud del pulso de respuesta, es constante para cada neurona.

La neurona al comportarse como un transductor a frecuencia con cualquier tipo de señal de entrada, simplifica con ello los mecanismos internos de transmisión del sistema nervioso.

La segunda función de la neurona se refiere a su plasticidad que podemos definir como su capacidad de modificar la estructura de su membrana de tal manera que aumente o disminuya su sensibilidad, o nivel de umbral a las diferentes señales de entrada. Esta modificación puede ser transitoria o permanente según la importancia biológica que tenga el estímulo para el organismo en una circunstancia dada.

El estudio actual sobre éste mecanismo plástico de la neurona está apenas en sus albores, por lo que en este trabajo no se tomará en cuenta. Sin embargo, un estudio profundo sobre éste tema es fundamental para la comprensión de las facultades más desarrolladas en el animal y en el hombre, como son: el aprendizaje, la conciencia, etc. De aquí que el siguiente paso necesario para continuar éste tipo de trabajos deberá referirse a ésta característica esencial de la neurona.

Una vez definidas las funciones generales de la neurona, se estudiarán en detalle las características transmisoras de la célula nerviosa y los fenómenos fisiológicos por lo cual dicha transmisión es realizada. Estos conceptos son fundamentales para la comprensión del modelo de la moto-neurona, que serán desarrolladas posteriormente.

SINAPSIS : Se define como sinápsis el contacto funcional entre dos células excitables (neuronas), cuyos citoplasmas se encuentran incluidos en diferentes membranas a través de un espacio intercelular que mide entre 150 a 100 Angstrom. (fig. 2.1 ab).

TRANSMISION QUIMICA DEL IMPULSO: La sinápsis se realiza de la siguiente forma: El impulso nervioso eléctrico, al llegar a la terminal del axón de la neurona transmisora (Región Presináptica), debe brincar el espacio intercelular que representa una alta resistencia. Esto se logra mediante una sustancia química, que se denomina transmisor sináptico almacenado en pequeñas vesículas de donde es liberado por medio de las enzimas que lo sintetizan a partir de los correspondientes precursores metabólicos. Existen dos tipos de transmisores químicos en general: los que actúan como excitadores y los que actúan como inhibidores.

El transmisor sináptico se combina con la membrana de la neurona receptora - (región postsináptica), a través del receptor específico del mismo, donde después es destruido por la enzima ahí localizada o bien es recapturado por la región pre o postsináptica al interior de la neurona. (fig. 2.2).

Al combinarse el transmisor sináptico con el receptor, (ver fig. 2.2), origina cambios en la permeabilidad de la membrana, ocasionando variaciones de potencial en la misma que serán descritos posteriormente. Estos cambios de potencial determinarán que se genere o no un impulso de respuesta, dependiendo si el pulso de entrada alcanza el valor umbral; en ésta forma el transmisor sináptico actúa como un puente químico a través del espacio-intersináptico.

Vista la sinápsis en forma general, se procederá al análisis del origen de los potenciales generados en la región post-sináptica.

a) Potencial de Reposo de la Membrana.

Entre la parte externa e interna de la membrana existe una diferencia de potencial, debido al gradiente electro-químico que se genera por las diferencias en la concentración fundamentalmente de iones como el Potasio (K), el Sodio (Na) y el Cloro (Cl). Cada uno produce su propio potencial de acuerdo a la diferencia de concentración entre el interior y el exterior de la célula; ésta diferencia tiende a producir un movimiento iónico a través de la membrana que es contrarrestado por la existencia de un potencial eléctrico (gradiente electro-químico).

Tomando la parte externa de la membrana como punto de referencia (0 volts), se han medido los siguientes potenciales para cada uno de los elementos.

MOTO NEURONA

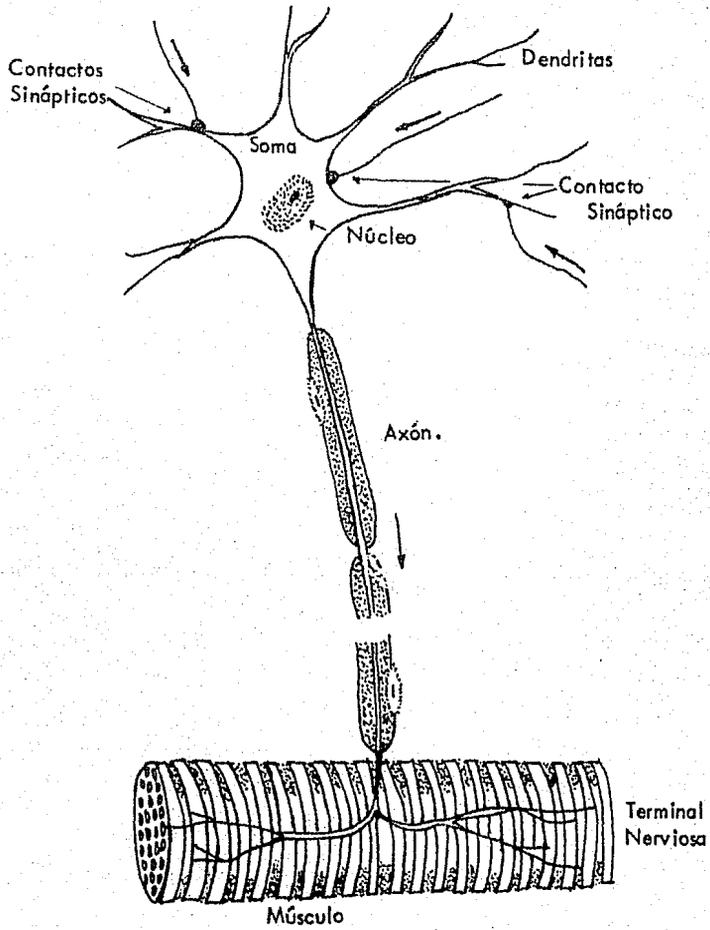
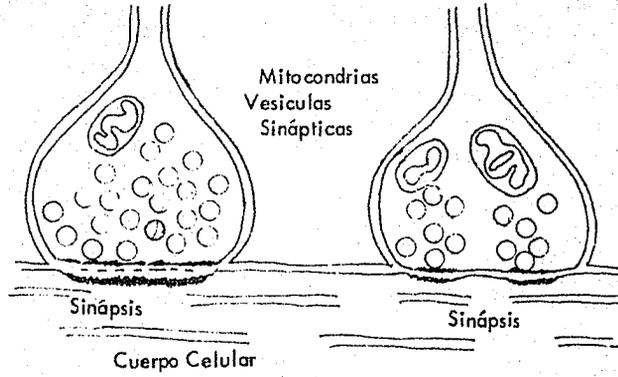


Fig. 2.1.a

CONTACTO SINÁPTICO



VESICULAS SINÁPTICAS

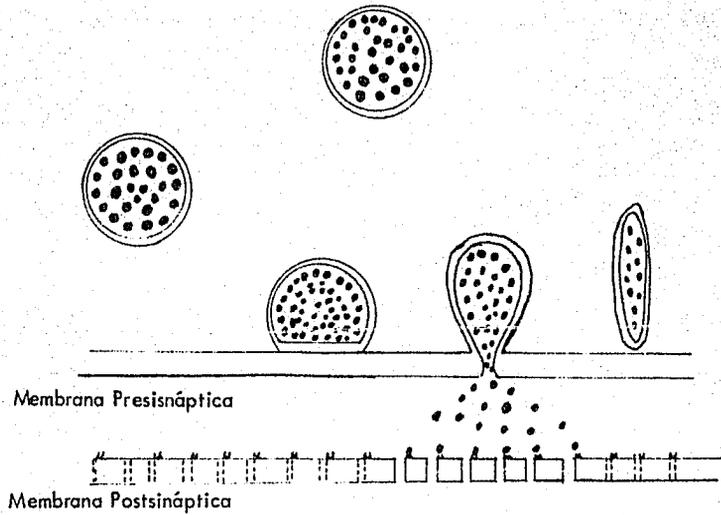


Fig. 2.1.b

K -70 a -100 mv.

Na +50 a +65 mv.

Cl -45 a -90 mv.

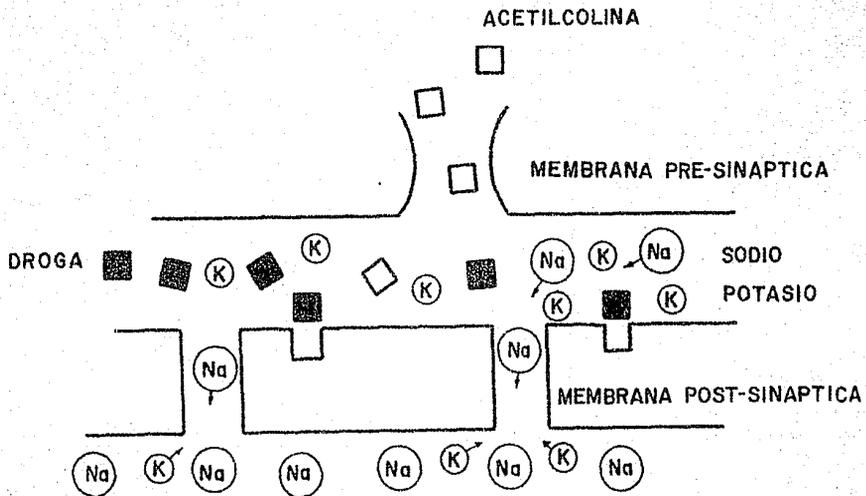
La suma de éstos potenciales nos dan un potencial de equilibrio característico de las neuronas (entre -70 a -90 mv) que es llamada "potencial de reposo" de la membrana. Es decir la membrana en reposo está polarizada. Este potencial cambia en función de la concentración iónica de los tres elementos químicos mencionados como veremos posteriormente.

b) Inducción de Diferencias de Potencial en la Neurona.

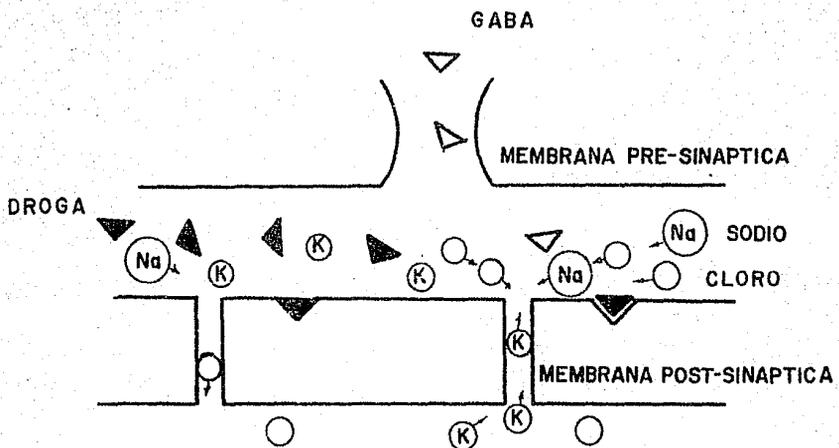
En el proceso de transmisión química, cuando el transmisor alcanza la región post-sináptica y se combina con el receptor mediante un mecanismo aún no bien conocido que parece involucrar la apertura de "poros" o "canales", produciendo un cambio en la permeabilidad de la membrana que permite que el Sodio (Na) y el Potasio (K), en caso de excitación, o el Cloro (Cl) y el Potasio en caso de inhibición, se muevan a través de la membrana de acuerdo con su gradiente electro-químico. Fig. 2.2 y 2.3.

Excitación : Si el cambio de permeabilidad descrito en el punto anterior, es de tal naturaleza que permite la entrada de Sodio (Na) al interior de la célula y la salida de Potasio (K) se produce una disminución del voltaje negativo de la membrana (disminución de la polaridad o depolarización); a éste fenómeno se le conoce como excitación y el transmisor sináptico que produce éstos cambios de permeabilidad se le denomina transmisor excitador. ver fig. 2.2 y 2.5 a.

SINAPSIS ACTIVADORA



SINAPSIS INHIBIDORA



TRANSMISION QUIMICA DEL IMPULSO NERVIOSO Y EL EFECTO DE

DROGAS

Fig. 2.2.

Después de un período de tiempo al ser eliminado el transmisor por los mecanismos encimáticos mencionados anteriormente, la célula por el mismo mecanismo metabólico que genera el potencial de reposo, expulsa el Sodio y captura nuevamente al potasio para retornar a su potencial de equilibrio o sea la concentración iónica original (repolarización). Fig. (2.3) y 2.5 a.

Inhibición: Si el transmisor al combinarse con el receptor aumenta la permeabilidad de la membrana con respecto al Cloro (Cl) entonces por la carga negativa de éste que penetra a la célula se produce un incremento en el voltaje negativo en la membrana (hiperpolarización). A éste efecto se le denomina inhibición y al transmisor sináptico que la produce se le llama transmisor inhibitorio fig.(2.2) como en el caso de la excitación al salir potasio el potencial retorna a su nivel original después de un tiempo, durante el cual se elimina el transmisor. fig. (2.5 b)

Debe notarse que la inhibición no es simplemente la "no excitación" de la neurona, sino que es un proceso activo que produce un efecto antagonico al de la excitación por lo cual los dos tienen igual importancia en la actividad del sistema nervioso.

UMBRAL; POTENCIAL LOCAL Y POTENCIAL DE ACCION

La neurona como elemento transmisor tiene un mecanismo sencillo que a través de los efectos que los impulsos tienen en el potencial de equilibrio de la membrana, le permite discriminar la importancia de los impulsos en función de su amplitud.

Cuando el impulso es excitador, o sea que produce una despolarización en la membrana y ésta alcanza un valor límite (entre -40 a -60 mv.) la célula nerviosa produce por un mecanismo independiente del de la polarización, un pulso que se denomina

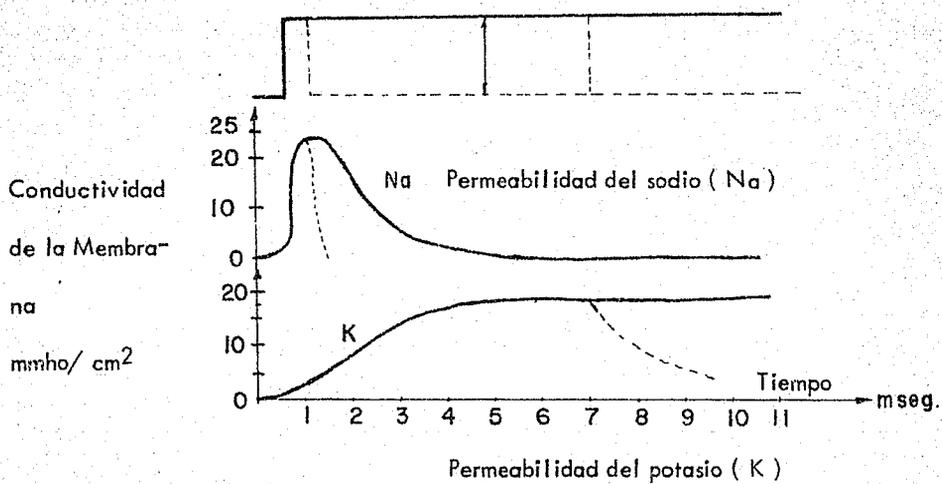


Fig. 2.3 Cambio en la permeabilidad de la Membrana

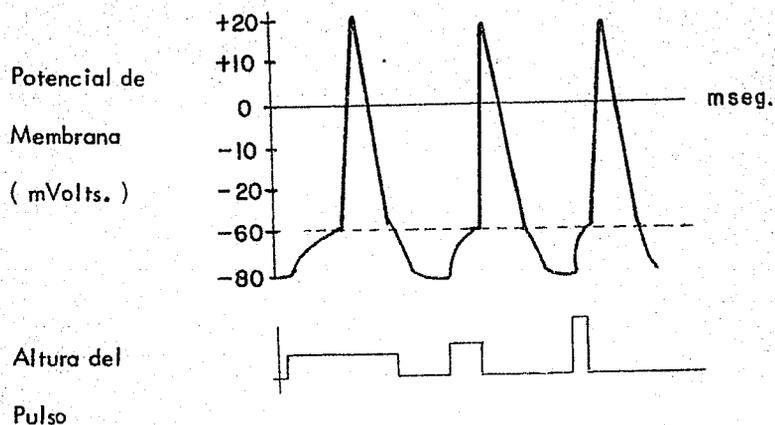


Fig. 2.4 Respuesta de la Membrana a la duración y altura del pulso

Potencial de acción, que es el impulso que se propaga a lo largo del axón (potencial - propagado). Al valor límite de depolarización necesario para que la neurona produzca un potencial de acción se le denomina Umbral fig. (2.4).

Si la excitación no alcanza el valor del umbral de la neurona, ésta no activa - el mecanismo de disparo y solo se observa una depolarización local de la membrana denominada Potencial Local el cuál no se transmite a la siguiente neurona. fig. 2.5 a y b.

Si la señal de estímulo es una inhibición, se producirá solamente una hiperpolarización local a consecuencia de la cual la depolarización necesaria para alcanzar el umbral aumenta y por consiguiente la posibilidad de producir un potencial propagado en la neurona post-sináptica disminuye.

Debe notarse que la neurona solo transmite cuando la señal de entrada es excitadora y la amplitud de ésta señal alcanza el umbral de activación. Si éstas condiciones no se cumplen la neurona sólo producirá un potencial local (*)

En base a ésta propiedad de las neuronas de responder unicamente a un valor dado de umbral, se le puede estudiar como un elemento lógico en donde solo existen dos estados posibles: si responde, no responde. Por ésto puede surgir un análisis matemático del fenómeno de la sinápsis como lo estudiaremos posteriormente en la lógica neuronal.

(*) Ésto es cierto solamente si no se consideran las características de integración y su - mación de la neurona, que serán explicadas posteriormente.

Una vez que se han estudiado los mecanismos de la transmisión sináptica entre dos neuronas, por las propiedades de la membrana anteriormente expuestas se procederá a un análisis del comportamiento neuronal ante una señal de frecuencia variable y ante la aplicación de varias señales simultáneas sobre su cuerpo, lo cual nos llevará hacia dos procesos fundamentales de la transmisión neuronal:

Sumación Paralela o Simultánea:

Una de las características fundamentales en la membrana es su capacidad de sumar espacialmente diferentes entradas que se aplican simultáneamente en diferentes zonas, dando como resultado la suma algebraica de todas ellas. Esta suma algebraica incluye a los estímulos inhibidores que hiperpolarizan la membrana, fig. (2.5. a y b).

Sumación Serial (integración):

Así como estudiamos que la neurona tiene un mecanismo sensible a la amplitud, nos encontramos que la membrana por sus características capacitivo-resistivas, es sensible a la frecuencia de la señal de excitación, por medio de la reacción lenta en los cambios de polaridad debido a los pulsos de entrada y por el tiempo que tarda en recuperar el potencial de reposo (repolarización). Si éste tiempo de repolarización es mayor que el tiempo en que llega otro pulso, la depolarización que produce éste, puede sumarse a la depolarización que existía debida al primer pulso, pudiendo entonces alcanzar el valor umbral y producir una respuesta, fig. (2.6).

Se han definido las propiedades que hemos considerado fundamentales de la neurona por lo que se pasará al estudio de las combinaciones en los circuitos neuronales en general para después dirigirnos al modelo de la motoneurona en particular.

Una vez que se han estudiado los mecanismos de la transmisión sináptica entre dos neuronas, por las propiedades de la membrana anteriormente expuestas se procederá a un análisis del comportamiento neuronal ante una señal de frecuencia variable y ante la aplicación de varias señales simultáneas sobre su cuerpo, lo cual nos llevará hacia dos procesos fundamentales de la transmisión neuronal:

Sumación Paralela o Simultánea:

Una de las características fundamentales en la membrana es su capacidad de sumar espacialmente diferentes entradas que se aplican simultáneamente en diferentes zonas, dando como resultado la suma algebraica de todas ellas. Esta suma algebraica incluye a los estímulos inhibitorios que hiperpolarizan la membrana. fig. 2.5ayb

Sumación Serial (integración):

Así como estudiamos que la neurona tiene un mecanismo sensible a la amplitud, nos encontramos que la membrana por sus características capacitivo-resistivas, es sensible a la frecuencia de la señal de excitación, por medio de la reacción lenta en los cambios de polaridad debido a los pulsos de entrada y en los cambios de polaridad debido a los pulsos de entrada y por el tiempo que tarda en recuperar el potencial de reposo (repolarización). Si éste tiempo de repolarización es mayor que el tiempo en que llega otro pulso, la depolarización que produce éste, puede sumarse a la depolarización que existía debida al primer pulso, pudiendo entonces alcanzar el valor umbral y producir una respuesta. fig. (2.6).

Se han definido las propiedades que hemos considerado fundamentales de la neurona por lo que se pasará al estudio de las combinaciones en los circuitos neuronales en general para después dirigirnos al modelo de la motoneurona en particular.

EFFECTO DE SUMACION

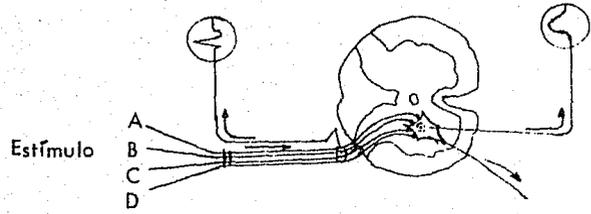
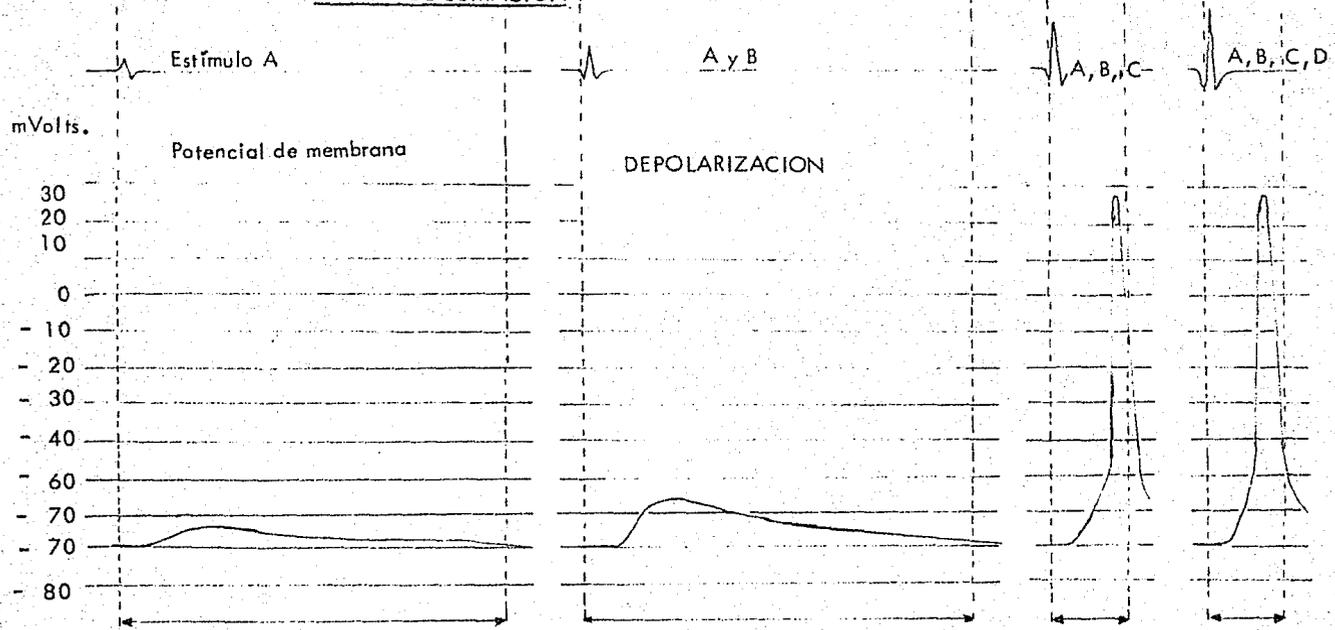
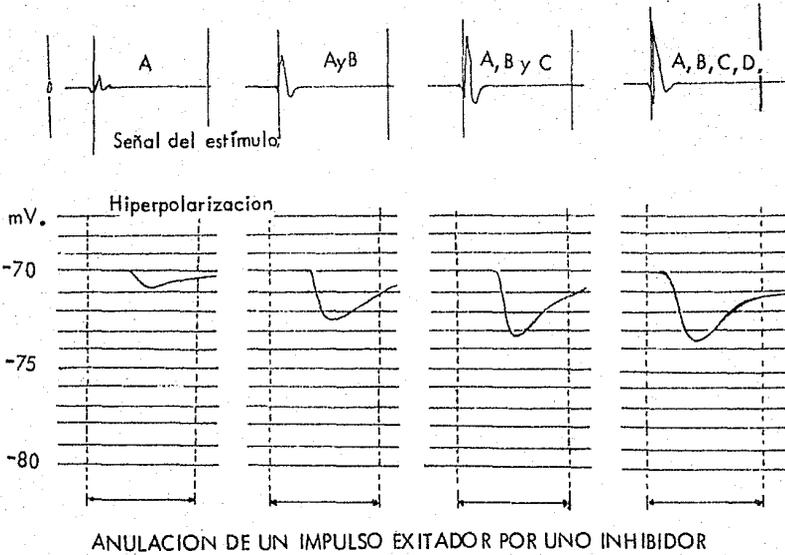


fig. 2.5a

FENOMENO DE SUMACION



ANULACION DE UN IMPULSO EXITADOR POR UNO INHIBIDOR

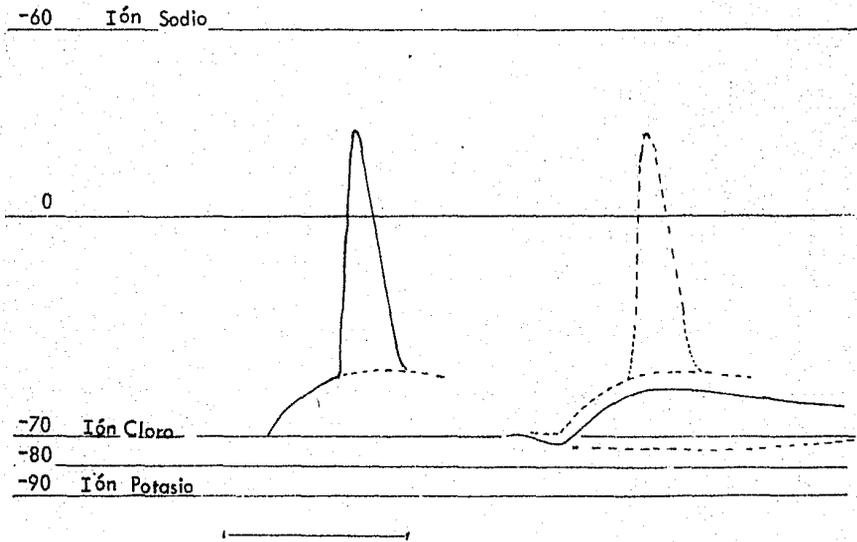


Fig. 2.5.b

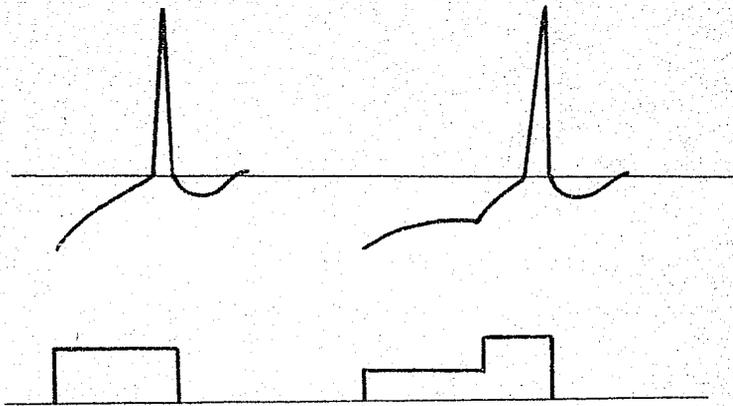


Fig. 2.6. Sumación Serial

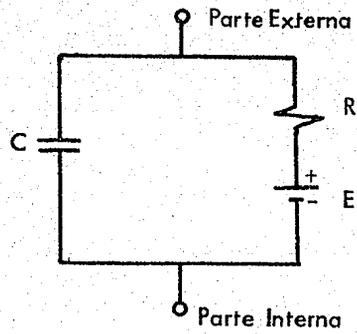


Fig. 3.1. Propiedades eléctricas de la membrana

Circuitos de Neuronas Excitadoras e Inhibidoras.

Al combinarse los elementos sencillos con las características descritas anteriormente el sistema nervioso realiza todas sus funciones por complicadas que éstas sean. En éste caso en particular se va a trabajar con un circuito que intenta simular en forma simplificada y mediante la combinación de neuronas excitadoras e inhibidoras, el sistema regulador de una moto-neurona (neurona que estimula directamente un músculo para producir un movimiento). El origen de éste modelo se debe principalmente a algunos de los métodos de investigación ampliamente usados en el estudio del sistema nervioso, por lo que es necesario un pequeño estudio sobre ellos.

Utilización De Drogas Que Afectan La Transmisión Sináptica.

Las drogas son sustancias químicas que producen reacciones específicas al ser introducidas en el organismo del animal en estudio. Se han utilizado extensamente en el estudio del sistema nervioso así como en cierto tipo de enfermedades.

El presente trabajo, está basado en los resultados obtenidos con el uso de ciertas drogas que actúan en el sistema nervioso, afectando directa o indirectamente la transmisión sináptica. Esta acción puede ocurrir mediante alguno de los siguientes mecanismos.

- a) Acción directa sobre la membrana post-sináptica.
- b) Inhibición de la enzima que sintetiza a la sustancia transmisora en la región presináptica.
- c) Inhibición sobre las enzimas que destruyen a la sustancia transmisora en la región post-sináptica.

- d) Inhibición de la recaptación de la sustancia transmisora.
- e) Inhibición de la interacción de la sustancia transmisora con el receptor post-sináptico.

Los distintos efectos de las drogas se pueden clasificar de la siguiente manera:

1) Excitadoras directas: La droga produce una depolarización en la membrana post-sináptica actuando como un excitador mimético, o bien por un efecto directo sobre la permeabilidad de la membrana a los iones.

2) Inhibidoras: La droga produce una hiperpolarización en la membrana.

También hay inhibición en el caso de que la droga actúe inhibiendo la enzima que sintetiza al transmisor excitador en la región pre-sináptica o bien cuando bloquea la combinación de dicho transmisor sobre su receptor en la membrana post-sináptica.

3) Inhibidora de Inhibición: La droga actúa en éste caso, sobre la enzima sintetizadora del transmisor inhibitorio o sobre la enzima destructora del transmisor excitador, en ambos casos impidiendo la acción neuronal.

Convulsivantes y Anticonvulsivantes.

Drogas Convulsivantes: ciertas drogas actúan en las formas indicadas en el punto anterior, sobre los circuitos neuronales involucrados en el control de la actividad motora (moto-neurona), cuya acción produce un efecto final sobre las moto-neuronas que excitan los músculos que realizan la contracción. Estas drogas al ser aplicadas producen una descarga paroxística de dichas moto-neuronas y por consiguiente se producen convulsiones.

Drogas Anticonvulsivantes: Si la droga al ser aplicada disminuye la actividad de la moto-neurona, previniendola contra las convulsiones se denominan drogas anticonvulsivantes. (Fig.2.3.)

Estos tipos de drogas son elementos fundamentales en la deducción de modelo de éste trabajo como veremos posteriormente.

CAPITULO III

IMPLEMENTACION ELECTRONICA DE LA NEURONA

Utilidad de un Modelo Electronico.

Toda investigación realizada en el sistema nervioso se enfrenta con el problema de la difícil obtención de datos exactos en la medición; por un lado debido al tamaño microscópico de los elementos que lo constituyen, y por otro a la dificultad de aislar una zona específica para su estudio, por los contactos inter-neuronales tan extensos y complicados en la misma zona. Esta dificultad trae como consecuencia una falta de claridad en el comportamiento de las diferentes variables en el sistema y por tanto posibles errores en la formulación de las hipótesis.

Para evitar caer en éstas indeterminaciones, el científico debe buscar un método de investigación que le permita, a partir de los resultados obtenidos, encontrar las características fundamentales del sistema y en base a éstas, crear un modelo --- que las represente. Con lo cual se obtienen las siguientes ventajas:

- 1.- a) Aislar las diferentes variables que actúan sobre el sistema, dando una mayor claridad sobre su funcionamiento.
- b) La posibilidad de estudiar independientemente las variables y observar el - efecto que produce cada una de ellas sobre el sistema en general.
- c) La posibilidad de comprobar las hipótesis postuladas por la investigación y hacerlas más consistentes en función de los resultados obtenidos por el modelo.
- d) Encontrar fenómenos que no se habían postulado en la investigación directa del sistema, pero que el modelo reproduce, lo que permite deducir nuevas hipótesis que se buscará confirmar con la realidad.

e) Poder realizar la investigación sin necesidad de destruir lo que se estudia.

Por otra parte la creación de un modelo electrónico fundamentado en lo visto en la primera parte de este trabajo, abre posibilidades en el desarrollo tecnológico, especialmente en la Rama de comunicaciones y de Computación, tanto para el modelo de una unidad neuronal como para el sistema multi-neuronal, por las ventajas que representa como un transmisor discriminativo de información en el primer caso, como por los múltiples efectos que se pueden crear por sus combinaciones en el segundo.

Una tercera ventaja o utilidad general de la creación de un modelo electrónico de un sistema neuronal como el que aquí se describe es la posibilidad de mostrar claramente las características fundamentales de su funcionamiento lo cual lo calificaría, como un instrumento de enseñanza, sobre el sistema nervioso y la fisiología neuronal en general y sobre la actividad neuro'motora en particular.

Este método de enseñanza a través de modelos que simulen la acción del sistema, tiene una gran fuerza didáctica por la facilidad del aprendizaje y por el impacto emotivo que producen sobre el estudiante, desde el nivel elemental hasta la enseñanza media ó media superior.

Con el tiempo todo sistema de educación deberá contar con este tipo de modelos para el aprendizaje activo en todos los niveles educativos.

Creación Del Modelo Electrónico:

Como primer paso para la realización del sistema de 7 neuronas es necesario la formulación y construcción de la unidad neuronal con las características biológicas transmisoras que hemos postulado, para que en base a ésta célula nerviosa - simulada, procedamos a la construcción del modelo completo.

Construcción Electrónica De La Neurona:

Además de las características biológicas de transmisión estudiadas en la neurona, la construcción del modelo se ha basado en los principios esenciales de la lógica dependiente del tiempo (Lógica Neuronal), basada en la neurona matemática, que es una simplificación de la biológica, que nos permite mediante su análisis lógico predecir la respuesta del sistema ante una entrada dada. Esta lógica se trata - en otro capítulo.

Características Biológicas Estudiadas De La Sinapsis Y Simulación Electrónica de Ellas:

En base a datos experimentales (Katz, Eccles), se ha encontrado que la sinapsis neuronal se realiza en base a tres propiedades fundamentales de la membrana que son: capacitancia, resistencia y potencial como se muestra en la figura 3.1, estas propiedades, permiten que la membrana sea sensible a la amplitud, la duración, la frecuencia y la fase de una señal de información cualquiera.

Estas propiedades por otro lado, determinan la forma en que toda señal es procesada, dando origen a una serie de propiedades en la actividad de la célula nerviosa, que deben ser reproducidas ante cualquier intento de simulación neuronal.

Estas son:

1) El potencial de reposo de la membrana debe depolarizarse ante un pulso de entrada con un transmisor excitador. Fig. 3.2

2) El potencial de reposo de la membrana debe hiper-polarizarse ante un pulso de entrada con un transmisor inhibitor. Fig. 3.2

3) La membrana debe sumar espacialmente todas las señales que actúen sobre ella en un instante dado, ya sea excitadoras o inhibitoras. Fig 2.5 a y b

4) La membrana debe tener un tiempo de repolarización que permite sumar en el tiempo una señal dada, cuando el tiempo entre dos pulsos consecutivos es menor que dicho tiempo de repolarización. Fig. 2.6

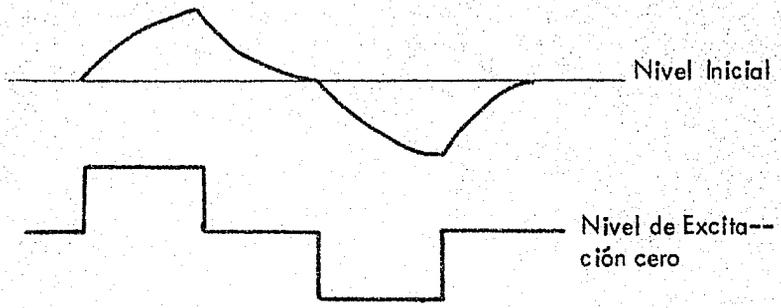
5) La neurona debe tener la propiedad de que ante una depolarización dada (umbral), produzca un potencial de acción. Fig. 2.4 y 2.5 a

6) La respuesta de la neurona debe tener un retardo frente a la señal de excitación. Fig. 2.4

7) La neurona debe tener la propiedad de presentar un tiempo de insensibilidad ante la excitación, cuando se ha producido un potencial de acción. (tiempo refractario). Fig. 3.3

Estas propiedades deben ser implementadas electrónicamente, por lo que antes de pasar a la simulación en forma directa, necesitamos estudiar las características electrónicas de una serie de componentes, que nos permitirá comprender claramente como se ha realizado la simulación en cada una de sus partes.

El elemento que se adapta mejor a la simulación de las características capa



EFFECTO DE LA DEPOLARIZACION E HIPERPOLARIZACION DE LA MEMBRANA

Fig. 3.2.

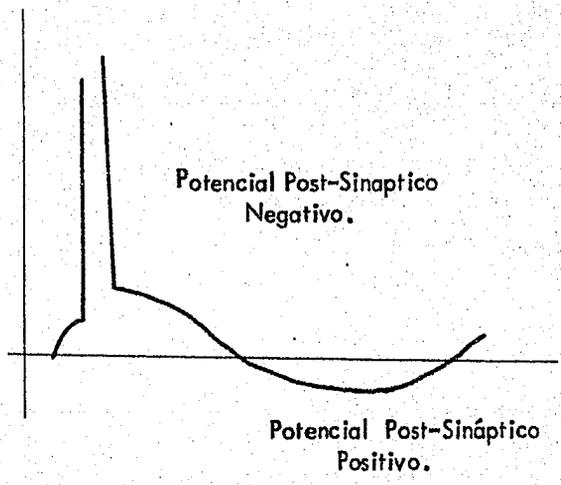


Fig. 3.3.

citivo-resistivas de la membrana neuronal, es el amplificador operacional como se verá posteriormente, por lo cual se estudiarán sus propiedades fundamentales para comprender claramente su funcionamiento.

El amplificador operacional es representado simbólicamente por un triángulo como el mostrado en la Fig. 3.4, donde e_1 y e_2 , son potenciales aplicados, ambos pueden ser variables, o uno de ellos puede fijarse a un voltaje de referencia - dependiendo de la aplicación que se busque realizar. La ecuación característica - del amplificador operacional es la siguiente:

$$e_o = f(e_1 - e_2)$$

donde (f) es la función de transferencia del amplificador.

Se considera el caso ideal del amplificador donde:

$$\text{Si } e_1 = e_2 \text{ nos da } e_o = 0$$

Parámetros de Operación:

Las características fundamentales del amplificador operacional ideal; considerado independiente de la entrada y de la realimentación son:

- a) Ganancia Infinita: Desde un punto de vista cuantitativo; esto permite que la función de transferencia sea únicamente función de las impedancias de entrada y de los circuitos de realimentación.
- b) Impedancia de entrada infinita: por esta característica, la señal de entrada no es afectada por el amplificador y no circula corriente por las terminales de entrada.
- c) Impedancia de salida nula: Por esto, el amplificador no es afectado por la carga y es capaz de transmitir cualquier cantidad de corriente para el circuito acoplado en la siguiente etapa.

AMPLIFICADOR OPERACIONAL

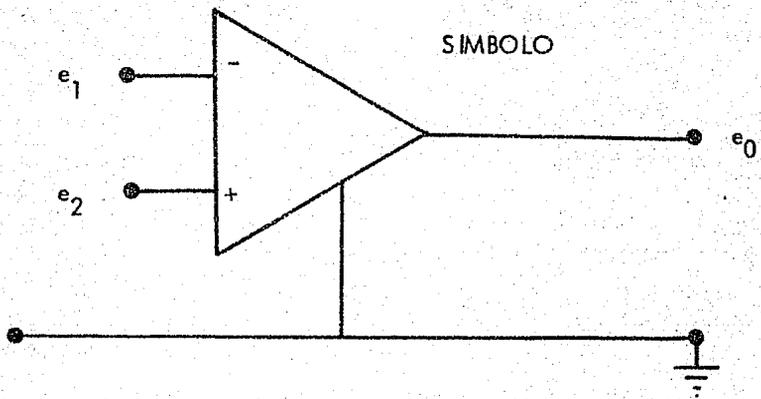


Fig. 3.5

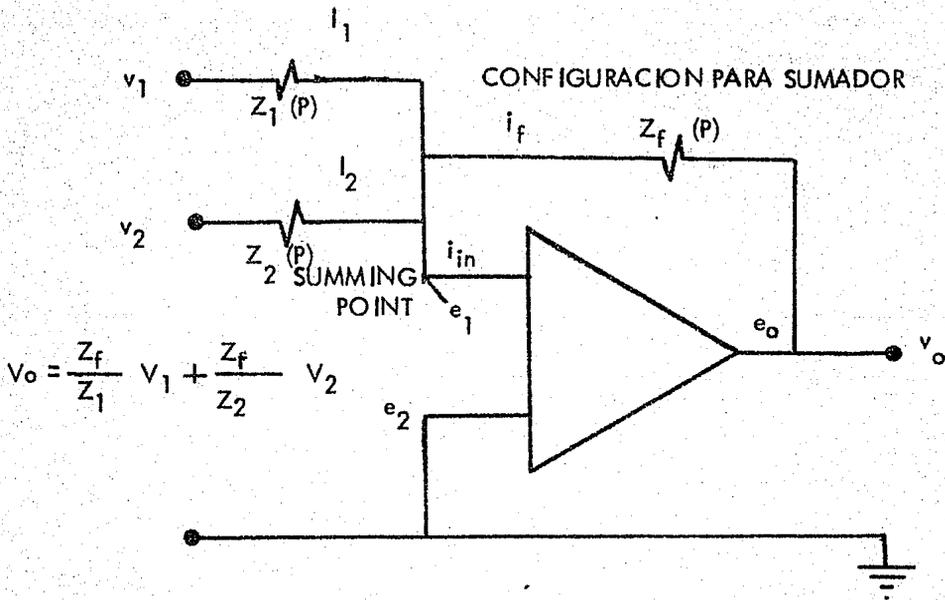


Fig. 3.4

d) Respuesta nula en el tiempo: Esto significa que la respuesta en frecuencia es totalmente plana y el ancho de banda infinito.

e) Desviación Nula: significa que cuando la señal de entrada $(e_1 - e_2) = 0$ la salida $e_0 = 0$.

Desde luego no siempre es posible despreciar las diferencias entre el caso real y el caso ideal en el funcionamiento del amplificador operacional; ésto lo estudiaremos posteriormente.

La primera propiedad que se simulará en el operacional, es la resistividad en la membrana, y se analizará cuales de las propiedades mencionadas al principio de la segunda parte se simulan con ella. Esta propiedad es implementada electrónicamente en el amplificador operacional de la siguiente forma:

En el circuito de la Fig 3.5, los voltajes V_1 y V_2 , son aplicados a través de las redes terminales cuyas funciones de transferencia son $z_1(p)$ y $z_2(p)$, y la salida es realimentada por una función de transferencia dada por $z_f(p)$; e_2 en éste caso se mantiene fijo y es conectado a tierra.

En el punto de sumación mostrado en la Fig. 3.5, el voltaje realimentado de la salida del amplificador operacional (tomando el caso ideal), produce un voltaje nulo (cero con respecto a tierra), lo cual hace que cada entrada sea independiente de las otras e independiente de la salida realimentada, teniendo por tanto:

$$i_{in} = 0 \text{ por lo siguiente } \quad i_1 + i_2 + i_f = 0 \quad (1)$$

de lo cual se deduce la siguiente relación:

$$\frac{V_1 - e_1}{z_1(p)} + \frac{V_2 - e_1}{z_2(p)} = \frac{e_1 - e_0}{z_f(p)} \quad (2)$$

Como consideramos al amplificador ideal, la ganancia es infinita por tanto:

$$e_1 = 0$$

y (2) queda reducida a:

$$\frac{V_1}{z_1(p)} + \frac{V_2}{z_2(p)} = -\frac{V_0}{z_f(p)} \quad (2a)$$

despejando $-V_0$, tenemos:

$$-V_0 = \frac{z_f(p)}{z_1(p)} V_1 + \frac{z_f(p)}{z_2(p)} V_2 \quad (2b)$$

Por lo que tenemos en el caso de (n) entradas y haciendo $z_1 = z_2 = \dots = z_n$

$$-V_0 = (V_1 + V_2 + \dots + V_n) z_f / z_1 \quad (2c)$$

Que es la ecuación que representa la suma algebraica de las señales de entrada, reproduciendo la propiedad (3) mencionada al principio.

Para calcular los errores en función de las señales de entrada, ya que el amplificador no cumple en la realidad con las condiciones ideales, tenemos haciendo $z_f = z_1 = R$ y asumiendo una carga $R_1 = 10K\Omega$, el error debido a la ganancia y a la impedancia de entrada está dado por:

$$D_{tot.} = 0.0005 \left\{ 2.1 + \left(\frac{10}{R} \right) (n+1) + \frac{R}{-50} + 2n \right\} \% R \text{ en Kiloohms}$$

referencia:

donde (n) es el número de entradas.

La variación debida a la temperatura en el sumador no tiene gran importancia por lo que la despreciamos.

La impedancia de entrada del circuito está dada por: $z_{in} = z_1 = R$
y la impedancia de salida:

$$z_{out} = 0.1 \text{ ohms.}$$

Todos éstos datos aplicados al modelo electrónico de la sumación en el cual simulamos 4 entradas ($n=4$), nos dan los siguientes resultados:

$$n=4; z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z_f = 47 \text{ Kiloohms.}$$

por tanto

$$z (in) = 47 \text{ Kiloohms.}$$

$$z (out) = 0.1 \text{ ohms.}$$

$$D (tot.) = 0.0005 \left\{ 2.1 + \left(\frac{10}{47} \right) (5) + \left(\frac{47}{50} \right) + 8 \right\} \% = 0.6\%$$

error que en nuestras condiciones puede despreciarse.

Pasemos ahora a la propiedad capacitiva de la membrana y veamos como es simulada por el operacional, qué es utilizado como un integrador como se muestra en la figura 3.6b; cuya ecuación de transferencia por lo antes visto es:

$$V_0 = - \left(\frac{1}{RC} \right) \int_0^{\tau} V_1 dt. \quad (3).$$

donde (τ) en el tiempo de integración

considerando que (V) es un escalón, tenemos que:

$$V_0 = - \frac{V_1 \tau}{RC} \quad (3a.)$$

ésto es considerando al amplificador como ideal.

Para el caso real tenemos:

$$V_0 = - \frac{V_1 \tau}{RC} - \frac{V_1(p+1)}{2A} \left(\frac{\tau}{RC} \right)^2 - \frac{V_1 z_0}{AR}$$

$$\text{donde } p = \frac{z_0}{z_1} + \frac{R}{z_{id}} + \frac{z_0 R}{z_1 z_{id}}$$

siendo: z_0 = Impedancia de salida.

z_1 = carga

z_{id} = Impedancia interna.

El error por la ganancia finita y la impedancia de entrada está dado por:

$$D(\text{tot}) = \frac{100+R}{A} \frac{\tau}{RC} \quad \%$$

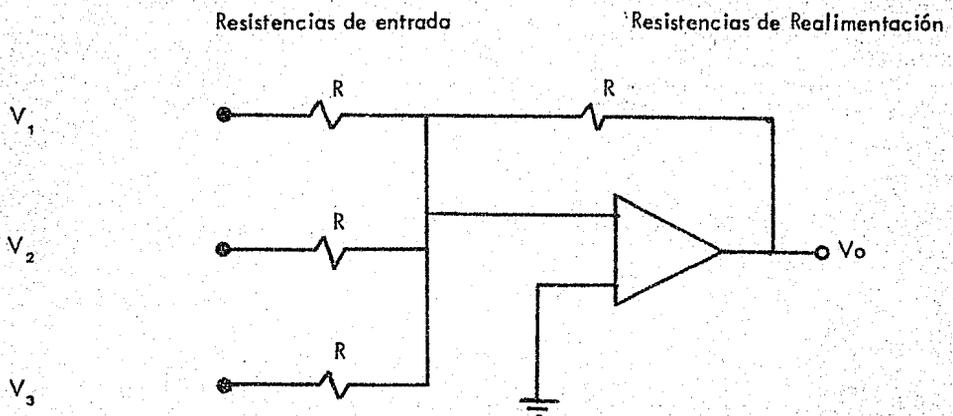
y el error debido a la temperatura está dado por:

$$\Delta V_0 = \left(\frac{\tau}{RC} \right) (0.0028R + 3) + 3 \mu V/^{\circ}C$$

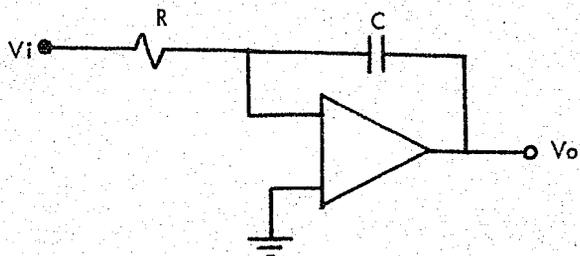
Aplicando ésto a nuestro modelo y tomando en consideración que la entrada de los pulsos se ha estandarizado a las siguientes características;

Voltaje = 3 Volts.

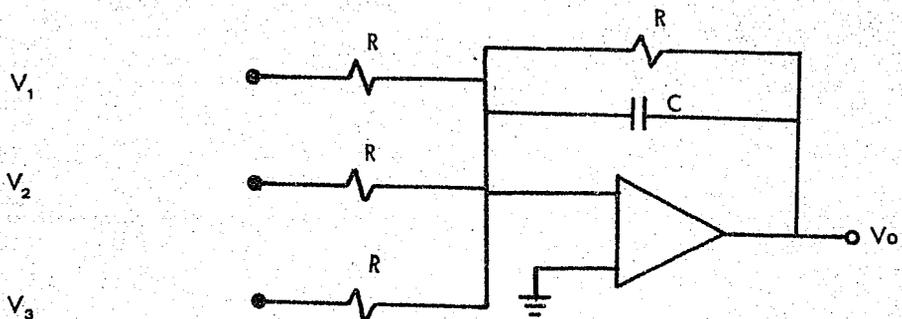
duración del pulso = 2 mseg. o sea $\tau = 2\text{mseg.}$



a) Configuración para sumador



b) Configuración para integrador



c) Sumador e integrador simultaneos

Fig. 3.6

Por lo que tenemos para el caso general:

$$V_0 = - \frac{V_1 \tau}{D} = -0.77 \text{ V despreciando los demás términos.}$$

$$D(\text{tot}) = 56 \text{ K/A}$$

La variación por temperatura está dada por:

$$\Delta V_0 = 4.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

Esta propiedad nos muestra que la señal de entrada es integrada por la combinación RC del circuito de la Fig. 3.6b, lo cual produce un retardo en la fase de la señal de entrada y si se toma un cero de referencia con la siguiente convención: excitador = pulso negativo
Inhibidor = pulso positivo

Se tiene que ante un pulso excitador, el operacional integra dicho pulso - invirtiéndolo como muestra la ecuación 3, dando una señal positiva que corresponde a la depolarización en la membrana; en el caso del inhibidor la salida es negativa, simulando la hiper-polarización de la membrana.

Se nota por tanto que los dos primeros puntos de la lista inicial se han simulado en forma correcta en principio, comparándose posteriormente los resultados - obtenidos electrónicamente con los datos biológicos actuales.

Estas dos propiedades de la membrana, pueden ser simuladas simultáneamente por el amplificador operacional como se muestra a continuación:

La Fig. 3.6c, muestra el circuito combinado de las dos partes anteriores, obteniéndose los siguientes parámetros de funcionamiento; considerando el caso ideal:

$$z = \frac{R_2}{R_2 C + 1} \quad \text{y} \quad V_0 = - \frac{z_f}{R_1} V_1 \tau \quad \text{si la entrada es un pulso como es}$$

el caso tenemos:

$$V_0 = - \frac{z_f}{R_1} V_1 \tau e^{-\frac{1}{RC} \tau} \quad (4)$$

La señal que recibe el integrador en la suma algebraica de las entradas, que en integradas en el tiempo de integración y decae exponencialmente en función de la constante de tiempo RC del circuito.

Aplicando éstos datos en el modelo, tenemos:

$$V_0 = - V_1 e^{-\frac{1}{2.6 \times 10^{-9}} \tau}$$

Los errores por la ganancia y la impedancia de entrada están dados por:

$D_1 + D_2 = 0.6\%$ si la amplificación es muy grande, los cambios por cambios de temperatura:

$$\Delta V_0 = 4.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$$

Como se observa en la ecuación, la unión de la capacidad con la resistencia nos produce las siguientes propiedades:

1) Ante un excitador o un inhibidor se genera un potencial local característico de la neurona Fig. 3.7 a y b.

2) Sumación espacial algebraica de las señales de entrada aplicadas simultáneamente. Fig. 3.8

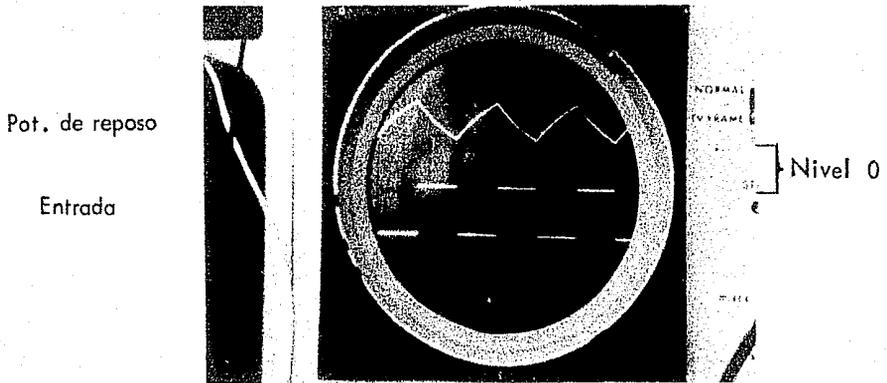


Fig. 3.7 a) Efectos de la Excitación dando un Potencial Local

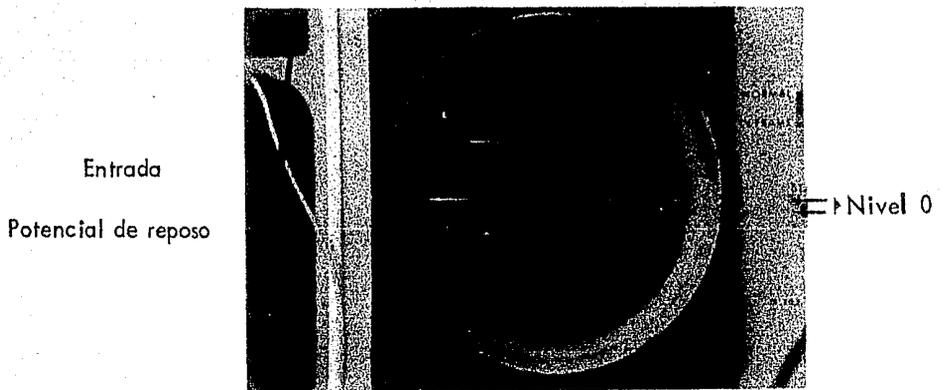


Fig. 3.7 b) Efectos de la Inhibición dando un Potencial Local Ver. Fig. 2.5 b) para comparación con la Neuro-
na Biológica.

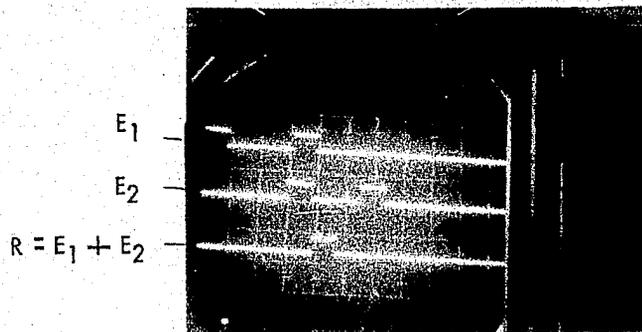


Fig. 3.8 Sumación Espacial Algebraica.

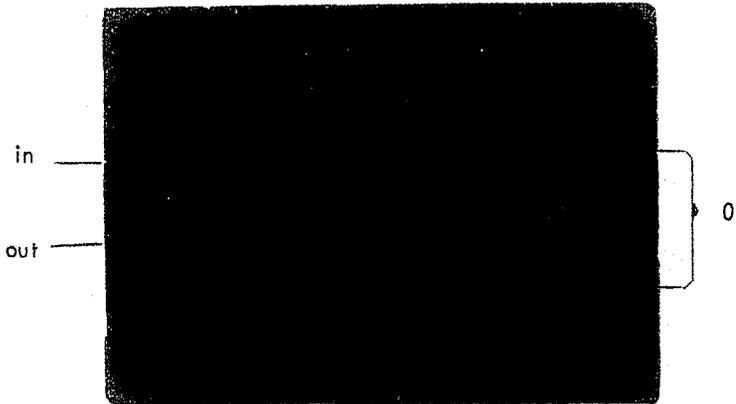


Fig. 3.9 Sumación Serial.

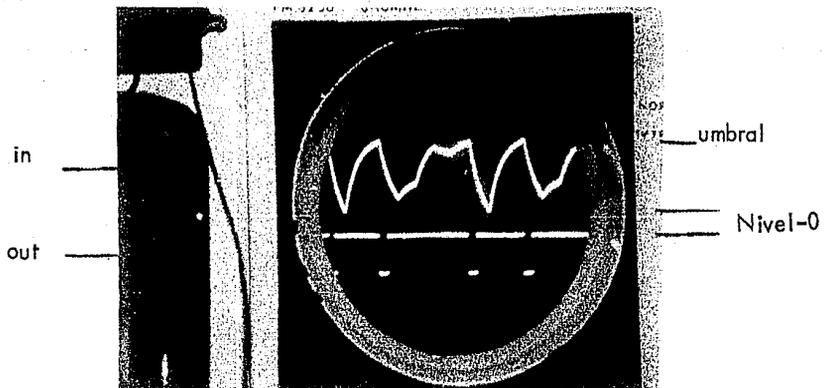


Fig. 3.10 Umbral.

3) Tiempo de repolarización dado por el término $V_e \left(-\frac{1}{R_c} \right)$ que permite la sumación serial, como fue explicado anteriormente. Fig. 3.9

4) Defasamiento (retardo) de la señal de entrada por el efecto de la integración realizada. Fig. 3.9

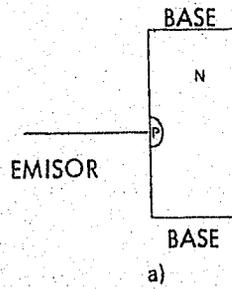
Dentro de las propiedades de la membrana mencionadas, nos resta estudiar la que se refiere a la existencia, de un potencial, que al alcanzar un límite (umbral), produce el potencial de acción. En otras palabras el umbral es un potencial que se opone al potencial de excitación y cuando la diferencia entre la excitación y el potencial de la membrana alcanza un valor determinado, se produce el potencial de acción.

Esta propiedad de la neurona la hemos simulado con un componente electrónico denominado: transistor de mono-juntura; que tiene la propiedad de conducir -- corriente, solamente cuando el voltaje de entrada ha alcanzado un valor límite (umbral).

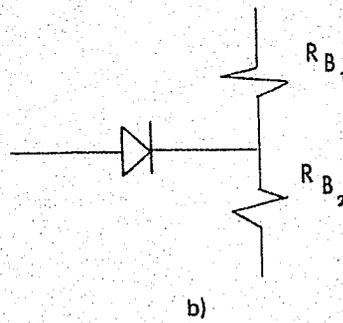
Esto se realiza de la siguiente manera: El mono-juntura, es un elemento - que contiene un emisor (material p), y una placa (material n), a la cual se le conectan en sus extremos las terminales que corresponden a la base 1 y base 2 como - muestra la Fig. 3.11a, al aplicarse un potencial a la placa del material N, ésta - por sus características resistivas produce el circuito equivalente mostrado en la Fig. 3.11b, creándose un potencial en el punto A, un poco menor que el valor medio - de la fuente, por la caída de potencial que ofrece R al paso de la corriente; éste voltaje es el que simula el voltaje umbral, ya que el voltaje aplicado en la entra

TRANSISTOR MONOJUNTURA

A) Condición física



B) Circuito equivalente



C) Simbolo



Fig. 3.11

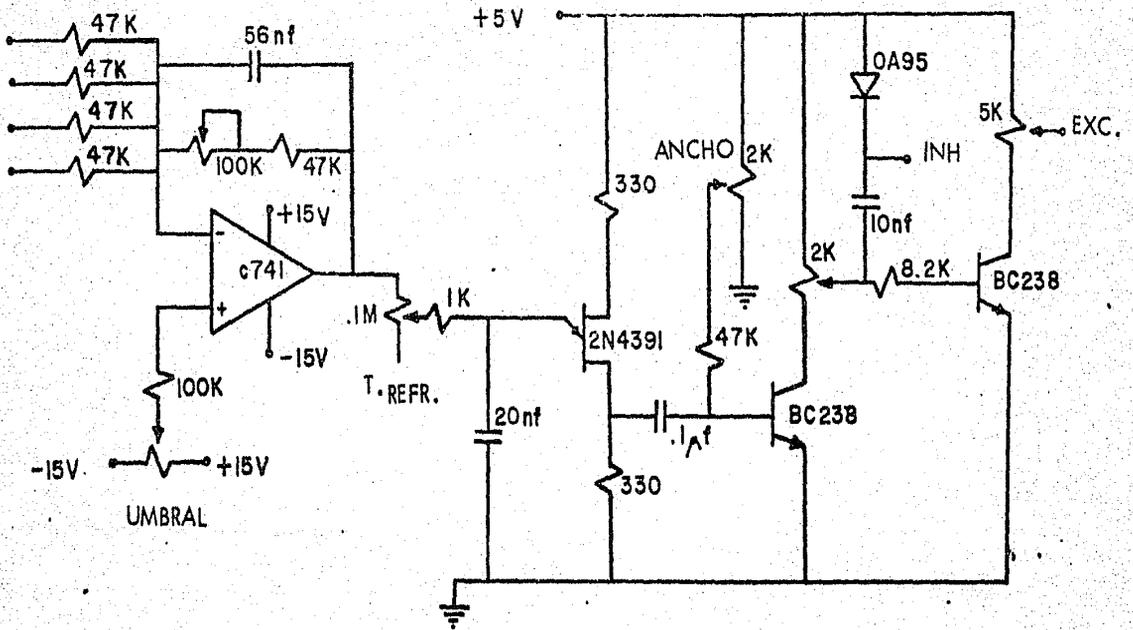
da del diodo tiene que ser 0.6 V. mayor que dicho voltaje para que pueda circular corriente, si éste es el caso el disparo del mono-juntura, simularía el potencial de acción de la neurona.

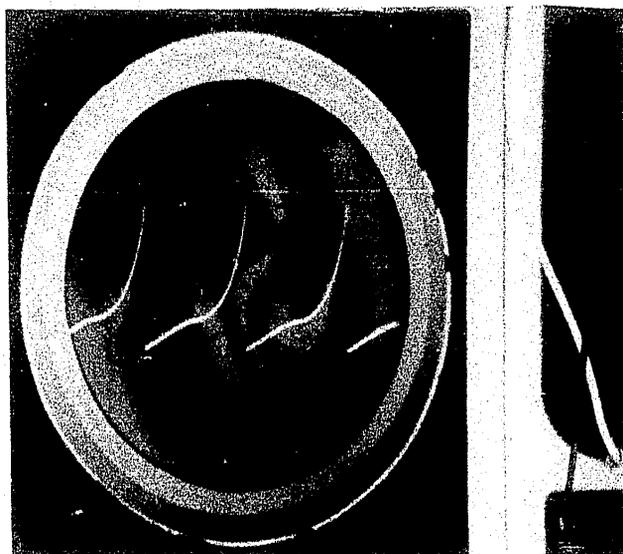
El símbolo electrónico del mono-juntura, se muestra en la Fig. 3.11c, dentro de las características importantes tenemos que la impedancia de entrada cuando el mono-juntura no está activado, es muy alta; reduciéndose casi hasta cero en el momento del disparo, mientras que la impedancia de salida es muy pequeña.

El voltaje que activa al mono-juntura es la salida de nuestra primera etapa, es decir la señal de entrada sumada e integrada que carga al condensador del mono-juntura a través de la resistencia variable como se muestra en la Fig. 3.12, si éste potencial de carga del condensador, llega al valor umbral, el mono-juntura conduce y produce un pulso como respuesta (potencial de acción). Fig. 3.10 y 3.13

Como estudiamos anteriormente es importante poder variar el valor de dicho umbral, para diferentes aplicaciones de la neurona, ésto se logra a través del potenciómetro de la Fig. 3.12, que introduce un voltaje (positivo o negativo), según sea el caso, en la entrada no invertida del operacional que se resta de la señal de entrada estudiada anteriormente controlando por tanto el nivel de disparo del mono-juntura, característica de gran utilidad para la modelación del modelo inter-neuronal.

El retardo y el umbral se muestran gráficamente en la Fig. 3.9, 3.10 y 3.14, cuando el potencial de integración no alcanza el valor umbral, se produce so





Post-Potencial .

Fig. 3.13 Potencial de Acción Invertido.
Ver. Fig. 2.6 para la comparación
con la Neurona Biológica.

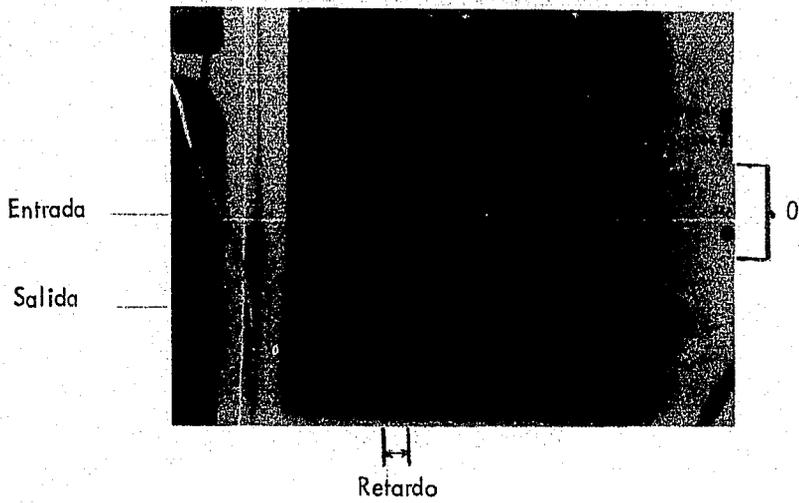


Fig. 3.14 Retardo producido por la Neurona Electrónica
Ver. Fig. 2.6 para la comparación con la Biología

lamente un potencial local sin respuesta del mono-juntura, tal como sucede en la neurona ante un potencial que no alcanza el valor umbral.

La resistencia variable R en la Fig. 3.12, que une al operacional con el mono-juntura, tiene la finalidad de regular la frecuencia de disparo de éste componente, pudiéndose simular a través de la constante de tiempo RC , al tiempo refractario, es decir el tiempo que tarda la neurona en poder disparar un segundo potencial de acción ante varios impulsos de entrada, tomando en consideración que dicha simulación no se acerca a lo que sucede realmente en la neurona biológica.

La siguiente etapa del circuito, es una parte meramente electrónica en la que el pulso del mono-juntura, es amplificado tanto en duración como en amplitud, para reproducir lo mas cercanamente el pulso de entrada, con un retardo característico.

Tomando en consideración que la neurona puede ser excitadora o inhibidora, necesitamos que el modelo pueda producir los dos efectos, sobre la siguiente célula, lo cual se logra en ésta etapa del circuito como se muestra en la Fig. 3.12

El circuito consiste en dos transistores acoplados, el primero acopla la señal del mono-juntura a través del capacitor para producir como respuesta en el colector del transistor un pulso cuadrado, en función de la polarización de base realizada por R que controla la duración del pulso.

La salida en el colector se toma a través del potenciómetro R lo que nos permite controlar su amplitud, ésta señal no está en referencia con la tierra general

por lo que la polarizamos a través del condensador y el diodo mostrados en la Fig. 3.12 obteniendo en el punto (I), la salida inhibidora del circuito.

La señal del colector del 1er. transistor, es invertida por el segundo, dando en el punto (E), la señal excitadora cuya amplitud puede ser regulada por el potenciómetro R.

Se hace notar que con las tres propiedades fundamentales de la membrana, hemos podido simular algunas de las características estudiadas de la transmisión neuronal, por lo cual pasaremos a la comparación entre la neurona biológica y la neurona electrónica punto por punto para evaluar objetivamente el resultado de la simulación.

Comparación Entre Neurona Biológica Y La Neurona Electrónica.

Todo modelo realizado, tiene por finalidad fundamental la de reproducir en base a las características generales, las funciones del sistema que se simula, siendo la comparación entre modelo y fenómeno real, el mejor método de evaluación para observar si se han cumplido satisfactoriamente las condiciones establecidas.

La comparación se hará etapa por etapa, como se ha hecho hasta ahora, mostrando los datos y gráficas obtenidos biológicamente (si la hay) y los datos y gráficas obtenidos en la neurona electrónica.

Las características que van a compararse han sido enlistadas en la primera parte de ésta sección, que enumeramos a continuación.

- 1) polarización: excitación.
- 2) polarización: inhibición.
- 3) Sumación paralela.
- 4) Sumación serial.
- 5) Umbral.
- 6) Retardo.
- 7) Tiempo refractario.

La comparación se hará en forma gráfica es decir por medio de fotografías se mostrarán las diferentes funciones simuladas por la neurona electrónica en comparación con los resultados obtenidos experimentalmente con la neurona biológica.

1) Polarización: Experimentalmente se ha encontrado que las características capacitivo-resistivas conectada como indica la Fig. 3.1, tiene una constante de tiempo de 2.4 mseg. y produce la respuesta mostrada ante la entrada; en la Fig. 2.4 en el primer caso una excitación produce la depolarización, una inhibición la hiper-polarización.

La neurona electrónica tiene una constante de tiempo de 2.6 mseg., mostrándose como responde ante la señal de excitación y de inhibición Fig. 3.7a y 3.7b. Comparando las figuras se ve que la respuesta es muy similar en ambos casos.

3) Sumación paralela: La sumación algebraica de las entradas es representada en las figuras 2.5 a y b donde se observa el efecto que se produce en la membrana con una entrada excitadora (depolarización), con una inhibidora (hiper-polarización) y con las dos excitadora e inhibidora actuando simultáneamente, así como el efecto

de sumación que se produce, en la Fig. 3.7 a y b y 3.8 se muestra lo que sucede con la neurona electrónica ante éstos estímulos observándose que tanto la forma de la depolarización como de la hiper-polarización y la suma de las dos son muy semejantes en ambos casos.

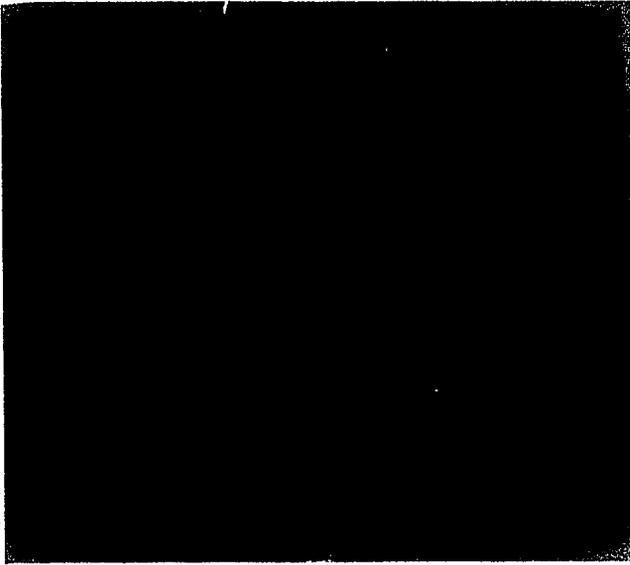
4) Sumación serial:

Se han hecho diferentes estudios sobre la reacción neuronal con respecto a la variación de la frecuencia con la señal de entrada (δ), llegándose a la conclusión de que cuando la frecuencia de la entrada se incrementa con el tiempo produce una "facilitación" en la respuesta neuronal; ésto se muestra en la Fig. 2.6 - comparándola con la Fig. 3.9 y 3.10, que es la respuesta obtenida electrónicamente. Cuando la señal alcanza el umbral observamos la generación de un potencial de acción tanto en la neurona biológica como en la neurona electrónica.

5) Umbral. 6) retardo

Tanto el umbral como el retardo se muestran en la Fig. 2.4, comparandose con los resultados obtenidos electrónicamente en la Fig. 3.10 y 3.14 notandose que el retardo se debe a la combinación de la integración con el umbral, fenómenos -- que en la neurona electrónica se han construido en forma independiente, aunque es tán relacionados estrechamente en su funcionamiento.

7) Tiempo refractario como se había mencionado anteriormente se ha simulado electrónicamente mediante un artificio que no se acerca a lo que sucede realmente en la neurona biológica, mostrandose solamente en la Fig. 3.15, lo que correspondería



H

T. R.

TIEMPO REFRACTARIO.

en la neurona electrónica a dicho tiempo.

Comparación de la sensibilidad:

Se ha estudiado anteriormente que toda señal es definida por cuatro parámetros principalmente: la amplitud, duración, frecuencia y fase; se ha observado que la neurona electrónica es sensible a dichos parámetros, dando una respuesta solo en función de la frecuencia ya que la amplitud y la duración de los pulsos que recibe se pueden considerar constantes en la mayoría de las neuronas. Este mecanismo permite la simplificación de la transmisión de una señal que proviene del exterior, la cual es captada en forma indirecta por un tipo especial de neuronas (receptoras), que transmiten la señal a las neuronas posteriores (transmisoras) en la vía nerviosa correspondiente por lo cual se puede hacer una diferenciación gruesa de dos tipos de neuronas:

- a) Las receptoras.
- b) Las transmisoras.

Las receptoras tienen la característica de que son igualmente sensibles a las 4 variables de la señal, (en cambio las transmisoras concretan su sensibilidad a la frecuencia, siendo la amplitud y la duración factores importantes para el disparo del potencial de acción, pero una vez que éste se ha realizado la membrana no es sensible al incremento en la amplitud ni en la duración del pulso en forma tan clara como en la neurona receptora.

Esta variación funcional de la sensibilidad en las neuronas biológicas, fue

observada en la neurona electrónica, al cambiar el valor que equivale a las características capacitivo-resistivas de la membrana, que en la neurona electrónica corresponde al valor de la relación RC (ver fig. 2.12), ésta relación no solo cambia la sensibilidad a la amplitud sino también a la duración y a la frecuencia.

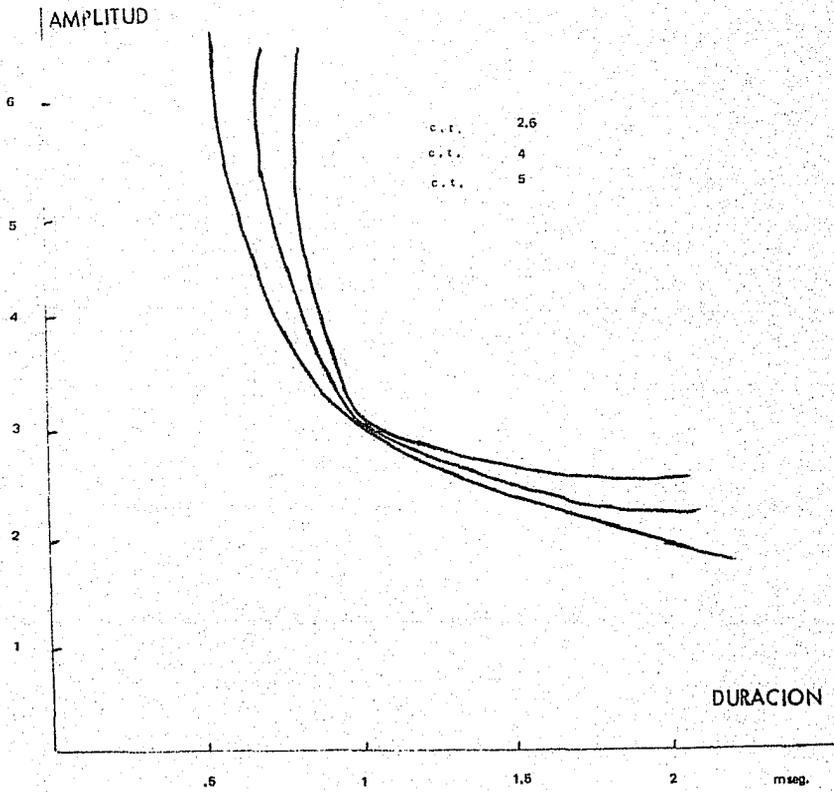
Las gráficas que se obtuvieron del punto anterior, se comparan con la gráfica que relaciona la duración y la amplitud de una moto-neurona biológica (referencia) en la Fig. 3.17, mientras que las obtenidas por la neurona electrónica se muestran en la Fig. 3.16a, en la que se puede observar la gran semejanza entre las dos; las otras dos gráficas de la misma Fig. 3.16 b y c no se pudieron encontrar - sus equivalentes biológicos por lo que se plantean simplemente como hipótesis, sobre la respuesta neuronal.

Aunque el modelo neuronal realizado por nosotros no es de ninguna manera el primero que se ha intentado (veanse por ej. referencias.), creemos que reúne dos características propias que a nuestro juicio son de interés:

- 1) La neurona electrónica descrita, reúne algunas características fisiológicas importantes de la neurona biológica en un sistema construido en forma relativamente simple y de tamaño práctico y 2) el modelo neuronal presentado fué creado no solamente como un fin en sí mismo, sino como una primera etapa para realizar un modelo multi-neuronal basado en datos biológicos obtenidos experimentalmente.

CURVAS DE LOS DATOS TOMADOS DE LA NEURONA ELECTRONICA

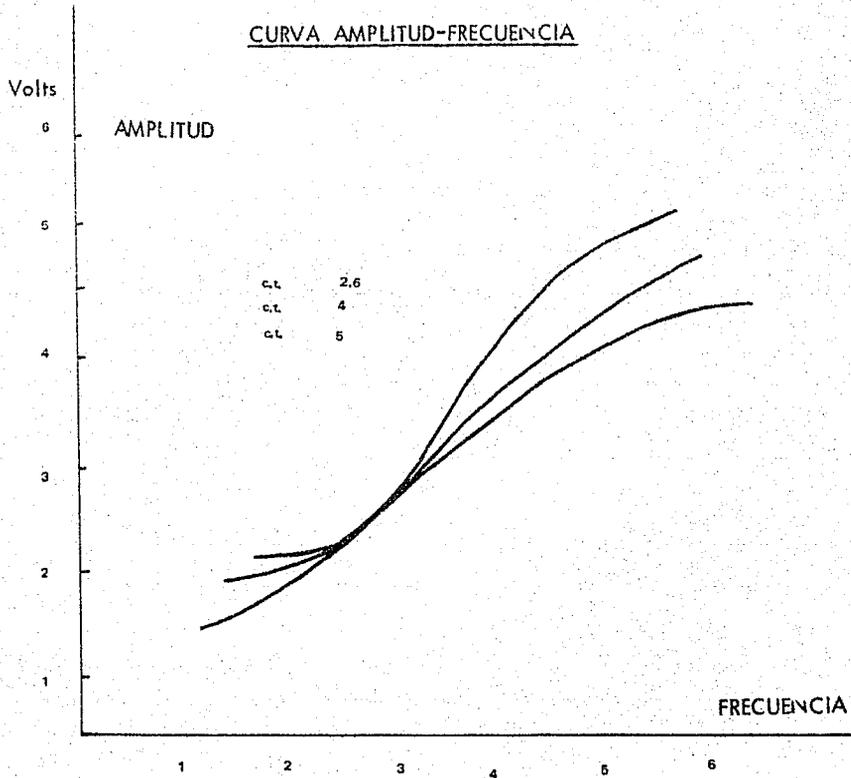
CURVA AMPLITUD-DURACION



<u>c. t.</u>	<u>2.6</u>	<u>Aml.</u>	<u>Dur.</u>	<u>c. t.</u>	<u>4</u>	<u>Ampl.</u>	<u>Dur.</u>	<u>c. t.</u>	<u>5</u>	<u>Ampl.</u>	<u>Dur.</u>
	6		.55		6		.69		6		.8
	5		.66		5		.7		5		.8
	4		.75		4		.8		4		.86
	3		1		3		1		3		1
	2		1.75		2.25		00		2.5		00
	1.5		00								

Fig. 3.16 a

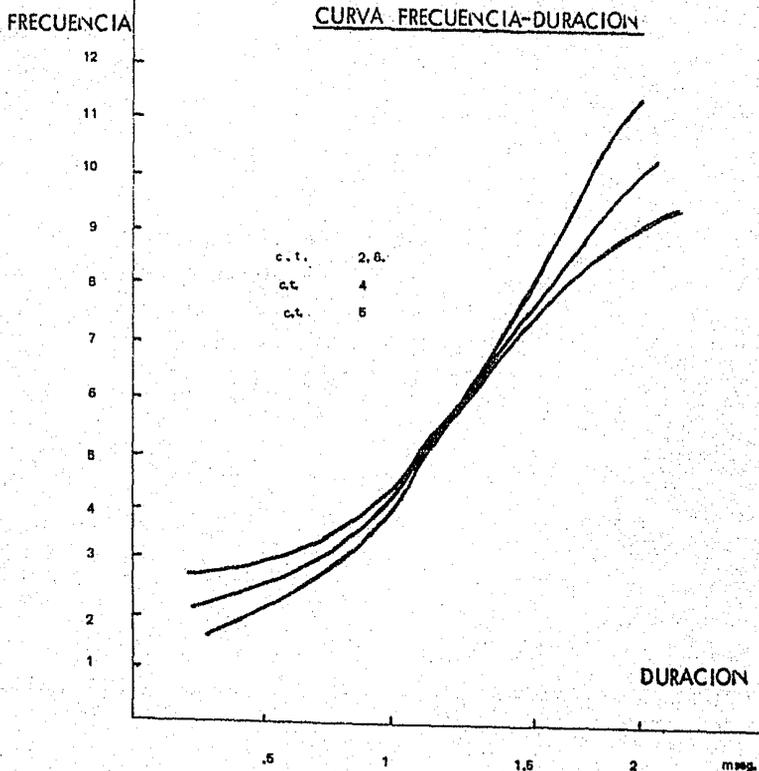
CURVAS DE LOS DATOS TOMADOS DE LA NEURONA ELECTRONICA



<u>c.t.</u> 2.6	Ampl.	Frec.	<u>c.t.</u> 4	Ampl.	Frec.	<u>c.t.</u> 5	Ampl.	Frec.
	1.5	1.25		2.5	2.85		2.5	2.85
	2	2.25		3	3.35		3	3.2
	2.5	2.85		4	4.8		4	3.9
	3	3.5		5	6.5		5	5.5
	4	6.1						

Fig. 3.16 b

CURVAS DE LOS DATOS TOMADOS DE LA NEURONA ELECTRONICA



<u>c. t.</u>	<u>2.8</u>	Frec.	Dur.	<u>c. t.</u>	<u>4</u>	Frec.	Dur.	<u>c. t.</u>	<u>5</u>	Frec.	Dur.
		2.5	.2			2	.2			2	.5
		3	.52			3	.7			3	.8
		4	1			4	1.04			4	1.04
		4.5	1.1			4.5	1.1			4.5	1.1
		5	1.15			5	1.18			5	1.18
		6	1.3			6	1.34			6	1.38
		7	1.44			7	1.48			7	1.54
		8	1.56			8	1.6			8	1.7
		9	1.66			9	1.76			9	2.1
		10	1.8			10	2				

Fig. 3.16 c

RELACION AMPLITUD-DURACION DE LA NEURONA BIOLOGICA

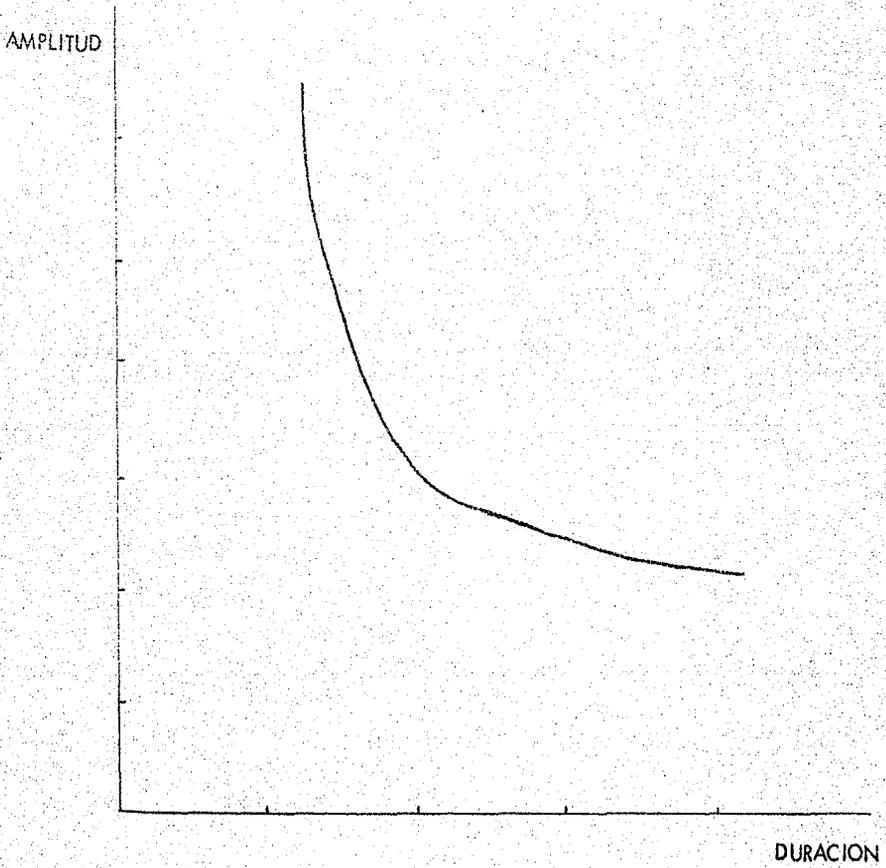


Fig. 3.17

CAPITULO IV

LOGICA NEURONAL

La lógica neuronal usa como elementos operacionales las neuronas matemáticas propuestas por Mc. Culloch y Pitts, que escogieron unas propiedades de la neurona fisiológica para definir su modelo matemático.

Es un modelo simplificado pero que permite reproducir todas las funciones de decisión y de memoria de la lógica propocional y de la teoria de autómatas, permite una representación muy adecuada de eventos secuenciales, y además eventos con duración in definida.

NEURONAS MATEMATICAS

Existen 3 tipos de neuronas:

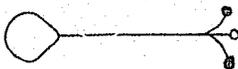
Receptoras
Intermedias
Efectoras o Motoras.

Neurona receptora



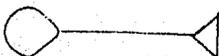
Consiste en un receptor, es decir un transductor que transforma las señales del medio ambiente en señales propias de la red, el estado $(1,0)$ se propaga por el axon que termina en una serie de bulbos.

Neurona Intermedia

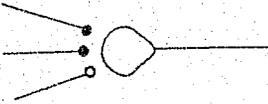


Consiste en una Soma que puede asumir dos estados $(0$ y $1)$, un axon y una cantidad teóricamente arbitraria de bulbos.

Neurona Efectora



Es igual a la anterior excepto que la terminal consiste en un efector es decir un transductor con que la neurona actúa sobre el medio ambiente.

SINAPSIS

La región en la que inciden los bulbos terminales de otras neuronas en el soma y le transmite su estado.

ESTADOS DE LA NEURONA

La neurona solamente tendrá dos estados que serán el de reposo =0 y el de excitación =1, y en el caso de excitación tendremos dos tipos de terminales, uno que excitará a la siguiente neurona y el otro que por el contrario inhibirá a la siguiente neurona a través de una sinápsis.

Hay dos clases de bulbos

exitador 

inhibidor 

ACTIVIDAD

A cada bulbo excitador se le asigna la actividad +1 si está prendido, y 0 si está apagado.

A cada bulbo inhibidor se le asigna la actividad -1 si está prendido, y 0 si está apagado.

La actividad de la sinápsis α es la suma algebraica de todos los bulbos que inciden en ella, si a_j es la actividad del bulbo j

$$\alpha = \sum a_j$$

UMBRAL

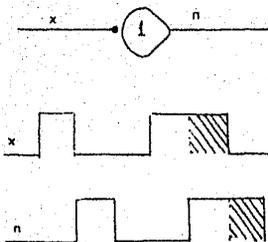
A cada neurona se le asigna un umbral U que es la actividad mínima requerida para su excitación.

Condición de excitación

$$x \geq U$$

TIEMPO

Hay un retardo fijo entre el momento en que llega el estímulo y el momento en que la neurona pasa al estado correspondiente al estímulo. Este retardo se toma como igual para todas las neuronas de una red y se considera como la unidad de tiempo en todo cálculo efectuado en ella. Y considerando el tiempo cuantizando en intervalos fijos y finitos, asumimos que el estado de la neurona no cambia dentro de cada intervalo haciendolo solamente de un intervalo a otro. La respuesta de una neurona a un estímulo ocurre entonces un tiempo después de la entrada del estímulo.



Ecuación característica de la neurona

$$n(t) = x(t-1)$$

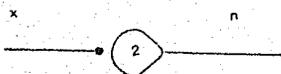
Que también se escribe:

$n_t = x$ es decir el estado de la neurona al tiempo t corresponde a su excitación al tiempo $(t-1)$.

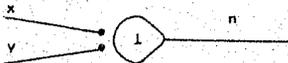
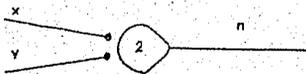
FUNCIONES LOGICAS

Representadas por neuronas.

De 1 variable:

La identidad: $n_1 = x$ La negación: $n_1 = \bar{x}$ Tautología: $n_1 = 1$ Antitautología: $n_1 = \emptyset$

De dos variables

Alternación: $n_1 = x \vee y$ Conjunción: $n_1 = x \cdot y$

Además de estas se pueden realizar diferentes funciones lógicas con solo cambiar el umbral a la misma configuración. Esto se muestra en la tabla siguiente.

Configuración	Actividad					Estado de la neurona un tiempo después						
	a	b	σ_a	σ_b	σ_{tot}	$U=3$	$U=2$	$U=1$	$U=0$	$U=-1$	$U=-2$	$U=-3$
	0	0	0	0	0	$U \geq 3$	0	0	0	1	$U \leq 0$	
	0	1	0	1	1		0	0	1	1		
	1	0	1	0	1		0	0	1	1		
	1	1	1	1	2		0	1	1	1		
							\emptyset	$a \cdot b$	$a \vee b$	1		
	0	0	0	0	0		$U \geq 2$			$U \leq -1$		
	0	1	0	-1	-1	0	0	1	1			
	1	0	1	0	1	0	0	0	1			
	1	1	1	-1	0	0	1	1	1			
						\emptyset	$a \bar{b}$	$\bar{a} \bar{b}$	1			
	Igual al anterior intercambiando a y b											
	0	0	0	0	0							
	0	1	0	-1	-1							
	1	0	-1	0	-1							
	1	1	-1	-1	-2							
	0	0	0	0	0		$U \geq 1$			$U \leq -2$		
	0	1	0	-1	-1	0	1	1	1			
	1	0	-1	0	-1	0	0	1	1			
	1	1	-1	-1	-2	0	0	1	1			
						\emptyset	$\bar{a} \bar{b}$	$\bar{a} \bar{b}$	1			
						$a \uparrow b$	$a \uparrow b$					

Para representar alternaciones y conjunciones de dos o más variables negadas o afirmadas, se procede de la manera siguiente:

Poner para cada variable afirmada un bulbo exitador

para cada variable negada un bulbo inhibidor

UMBRAL PARA LA CONJUNCION: La conjunción tiene un solo 1 que corresponde a la actividad máxima que puede obtenerse con una configuración dada, es decir, todos los bulbos excitadores = 1 todos los bulbos inhibidores = 0

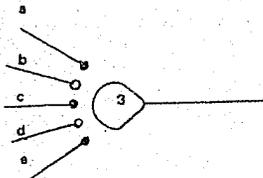
Por lo tanto $U = \text{número de bulbos excitadores}$, resultando una respuesta = 1 para α Máxima, y 0 para todos los demás casos.

UMBRAL PARA LA ALTERNACION: La respuesta de una alteración contiene un solo cero que corresponde a la actividad mínima, es decir que todos los excitadores = 0 y todos los inhibidores = 1, por lo tanto la actividad será $\alpha = -$ el número de inhibidores y el umbral será $U = \alpha_{\text{mín.}} + 1$ Lograndose $n = 0$ para $\alpha_{\text{mín.}}$ y $n=1$ para los demás casos.

Ejemplo:

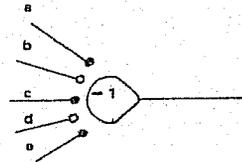
$$f = a.\bar{b}.c.\bar{d}.e$$

$$U = 3$$



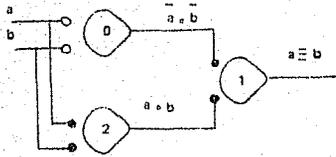
$$f = a\bar{b}c\bar{d}e$$

$$U = -2+1 = -1$$

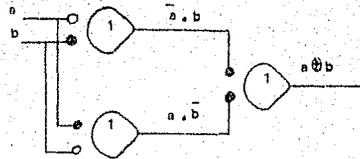


De las 16 funciones de 2 variables podemos realizar todas con una sola neurona, con estas reglas, con la excepción de Bicondicional y el O exclusivo, que tiene cada uno dos ceros y dos unos, y hay que realizarlas con dos neuronas es decir con dos tiempos de retardo, mientras que todas las demás son realizables en un tiempo solamente.

Bicondicional: $\bar{a}.\bar{b} \vee a.b$



\oplus Exclusivo: $\bar{a}.b \vee a.\bar{b}$



a	b	$a \equiv b$	$a \oplus b$
0	0	1	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

$$a \equiv b = \bar{a}.\bar{b} \vee a.b$$

$$a \oplus b = \bar{a}.b \vee a.\bar{b}$$

Ambas son importantes porque pueden ser usadas para efectuar comparación.

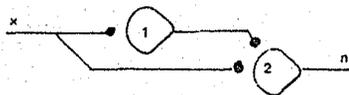
CIRCUITOS NEURONALES QUE RECONOCEN SECUENCIAS DE CEROS Y UNOS:

Este tipo de circuitos son muy importantes para el estudio del funcionamiento del sistema nervioso, como ejemplo tenemos los circuitos discriminadores del sistema visual, al reconocer formas colores etc.

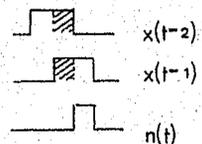
Se pueden formar desde circuitos muy simples hasta trenes muy complicados de patrones reconocibles con diferentes circuitos.

Para comprender con más claridad, observamos algunos ejemplos simples, mostrando el circuito, su ecuación y su gráfica temporal.

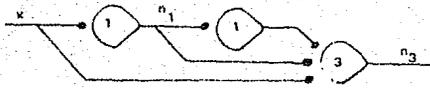
Reconocimiento de dos 1 seguidos, o sea 11



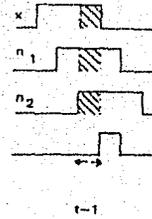
$$n(t) = x(t-1) \times x(t-2)$$



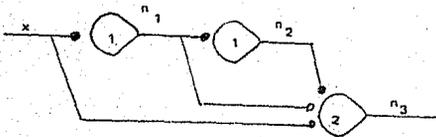
Reconocimiento del tren III



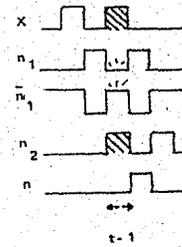
$$n(t) = x(t-1) \cdot x(t-2) \cdot x(t-3)$$



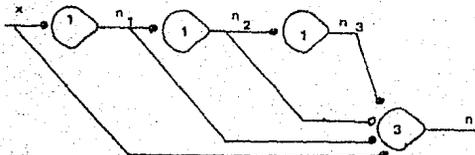
Reconocimiento del patrón 101



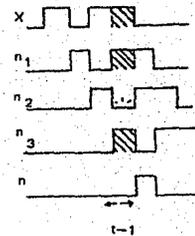
$$n(t) = x(t-1) \cdot \bar{x}(t-2) \cdot x(t-3)$$



Reconocimiento del tren 1011



$$n(t) = x(t-1) \cdot \bar{x}(t-2) \cdot x(t-3) \cdot x(t-4)$$



Reconoce una configuración de ceros y unos de 16 posibles, los otros 15 no hacen prender n al tiempo x .

Se observa (en los cuadros sombreados) que debido a los retardos de las neuronas intermedias, todos los pulsos llegan simultáneamente al tiempo $t-1$ en la sinápsis y la neurona n prende al tiempo t .

De la misma manera podemos realizar circuitos neuronales que reconozcan cualquier secuencia de los números 0 y 1.

OPERADORES DE LA LOGICA DEPENDIENTE DEL TIEMPO:

Señales del tipo de la anterior, como también procesos secuenciales más complejos, pueden representarse en una forma algebraica, introduciendo 3 operadores: I, N, R definidos como sigue:

Operador I de identidad.

$$I x(t) = x(t)$$

El operador I actuando sobre cualquier variable la deja sin cambiar.

Operador N de negación.

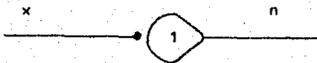
$$N x(t) = \bar{x}(t)$$

El operador N actuando sobre cualquier variable, la convierte en su negación.

Operador R de retardo.

$$R x(t) = x(t-1)$$

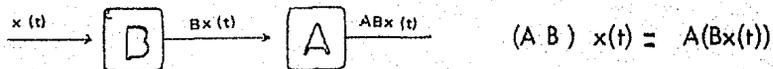
El operador R actuando sobre cualquier variable la retarda un tiempo. Este operador se representa precisamente por una neurona.



$$n(t) = R x(t) = x(t-1)$$

Producto Operacional.

Si A y B son dos operadores, el producto operacional AB aplicado a $x(t)$ se define como:



Es decir el operador A aplicado al resultado de B aplicado a $x(t)$.

Por lo general $AB \neq BA$ sin embargo, en el caso de los 3 operadores I, N, R el producto operacional es conmutativo.

De la definición de

$Ix(t) = x(t)$ tenemos que:

$$I(Nx(t)) = I(Nx(t)) = Nx(t)$$

$$N(Ix(t)) = N(Ix(t)) = Nx(t)$$

$$\text{Entonces} \quad NI = IN$$

$$R(Ix(t)) = Rx(t)$$

$$I(Rx(t)) = Rx(t)$$

$$\text{Entonces} \quad RI = IR$$

De la definición de $Nx(t) = \bar{x}(t)$ y $Rx(t) = x(t-1)$ tenemos que:

$$N(Rx(t)) = Nx(t-1) = \bar{x}(t-1)$$

$$R(Nx(t)) = R\bar{x}(t) = \bar{x}(t-1)$$

$$\text{Entonces} \quad RN = NR$$

Potencias de operadores:

$A^n x(t)$ se define como el operador A aplicado n veces a la variable $x(t)$.

$$I^2 x(t) = I(Ix(t)) = x(t)$$

$I^2 = I$ el operador I es idem
potente.

$$N^2 x(t) = N(Nx(t)) = N\bar{x}(t) = x(t)$$

$$N^2 x(t) = x(t)$$

$$N^2 = I = N^{2n}$$

$$N^3 x(t) = N(N^2 x(t)) = Nx(t)$$

$$N^3 = N = N^{2n+1}$$

Potencias pares de $N = I$

Potencias impares de $N = N$

$$R^2 x(t) = R(Rx(t)) = Rx(t-1) = x(t-2)$$

tendremos

$$R^n x(t) = x(t-n)$$

Definimos

$$R^0 x(t) = x(t)$$

Puede definirse entonces el adelanto

$$R^{-1} x(t) = x(t+1)$$

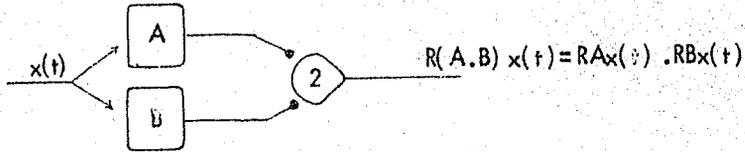
$$R^{-n} x(t) = x(t+n)$$

$$R^n R^m x(t) = R^{n+m} x(t)$$

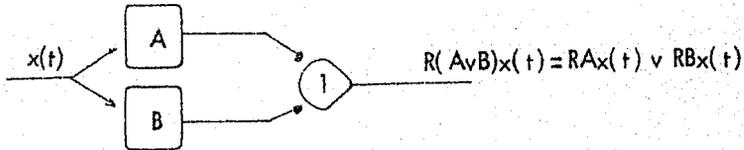
Para cualquier valor de n y m .

Pueden formarse también funciones lógicas de los operadores si estos se aplican a la misma variable.

La conjunción $(A \cdot B)x(t) = Ax(t) \cdot Bx(t)$



La alternación. $(A \vee B)x(t) = Ax(t) \vee Bx(t)$

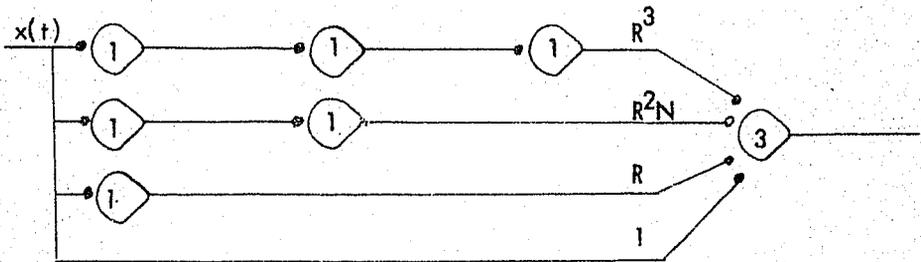


Nótese la diferencia con el producto operacional $AB(t) = A(Bx(t))$

Ejemplo . Aplicar el álgebra de operadores al diseño del circuito neuronal que reconoce la señal 1011 .

$$\text{Sea } e(t) = x(t-3) \cdot \bar{x}(t-2) \cdot x(t-1) \cdot x(t) = (R^3 \cdot R^2 N \cdot R \cdot I)x(t)$$

lo que nos da el siguiente circuito :



Transformando ahora la expresión, dado que $R^3 \cdot R^2 N \cdot R \cdot I = R(R^2 \cdot RN \cdot I)$

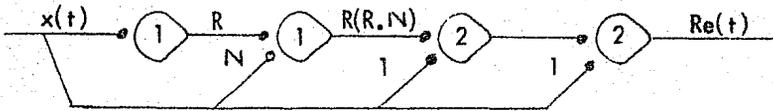
Además $R^2 \cdot RN = R(R \cdot N)$ se obtiene

$$R^3 \cdot R^2 N \cdot R \cdot I = R(R(R \cdot N) \cdot I) \cdot I \quad \text{Por lo tanto :}$$

$$e(t) = (R(R(R \cdot N) \cdot I) \cdot I)x(t) \quad \text{y tomando en cuenta el --}$$

retardo debido a la neurona de reconocimiento .

$Re(t) = R(R(R(R.N) . 1) . 1) x(t)$ Lo que da el circuito :



Diferente en su forma del circuito anterior, pero que resuelve el mismo problema.

La forma algebraica determina la forma del circuito neuronal .

OPERADORES DE TIEMPO INDEFINIDO :

Se requiere representar por un circuito neuronal el evento "ocurrió x" o en otras palabras "Principió x" esto quiere decir que ocurrió x ahora, o un tiempo antes, o dos tiempos antes ...

El evento "principió x" = $Px(t)$ será de la siguiente forma :

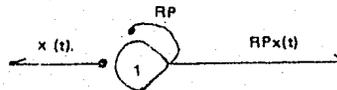
$$Px(t) = lx(t) \vee Rx(t) \vee R^2x(t) \vee \dots = (lvRvR^2vR^3v\dots)x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} R^k x(t)$$

Obtenemos la forma de P como :

$$P = lvRvR^2vR^3v\dots = lv(RvR^2vR^3v\dots) = lvR(lvRvR^2vR^3v\dots) = lvRP$$

Agregando además un retardo para el reconocimiento :

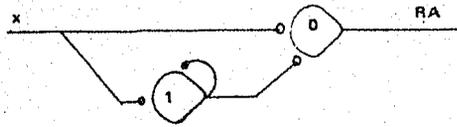
$RP = R(lvRP)$ y se representa por el siguiente circuito :



Semejantemente puede representarse el evento "Antes de ocurrir x" .

$Ax(t) = NPx(t) = N(lvRP)$ y aplicando la Ley de Morgan para efectuar -

la negación = $(N.NRP)x(t)$ representado por el circuito :



Se obtiene el circuito otra vez con un tiempo de retardo para el reconocimiento -

$$RA = R(N.RNP) \text{ y de } A = NP \text{ y } RA = NRP \text{ resulta también}$$

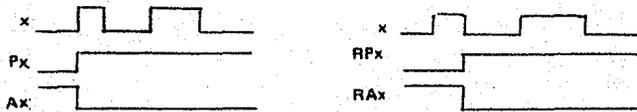
$$RA = R(N.RA) \text{ por lo que da el circuito:}$$



"+" significa que se dio 1 como el valor inicial a la neurona.

Los diagramas temporales para la funciones $P_x(t)$ y $A_x(t)$ con y sin retardo

serán :



Lo que da la expresión para "Después de x" = $D_x(t) = (N.RP) x(t)$ o sea

$RD_x(t) = R(N.RP) x(t)$ con el circuito :



R,A,D, forman a su vez un conjunto de operadores que combinados con los operadores básicos I,N,R hacen posible la representación de expresiones como "desde-hasta"

"el enésimo tiempo que ocurrió x" y otros del mismo tipo que permiten una descripción mas parecida al lenguaje natural de los eventos en el tiempo.

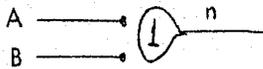
CAPITULO V

EXPERIMENTOS CON EL CONJUNTO NEURONAL

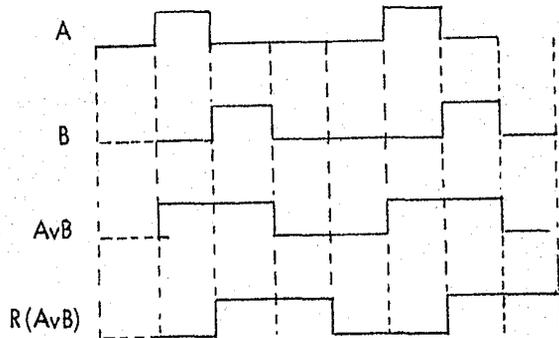
Este capítulo está destinado a mostrar los diferentes experimentos realizados con el grupo de siete neuronas fundamentados en los principios de la lógica neuronal (explicada en otro capítulo); aunque el grupo de neuronas se había construido inicialmente para la modelación del sistema neuro-motor, por las características de la unidad neuronal el sistema es lo suficientemente general para realizar combinaciones diversas como simulación de funciones lógicas o sistemas sencillos de algunas funciones del sistema nervioso.

1.-) Experimentos con una neurona.

a) Alternación.



$$n = R(A \vee B)$$



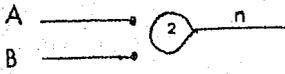
A _____

B _____

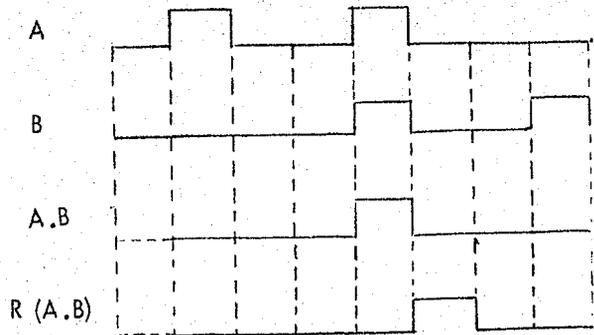
n = R(A v B) _____



b) Conjunción:



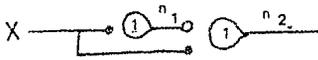
$$n = R(A.B)$$



11.- Experimentos con dos neuronas:

a) Función prende X.

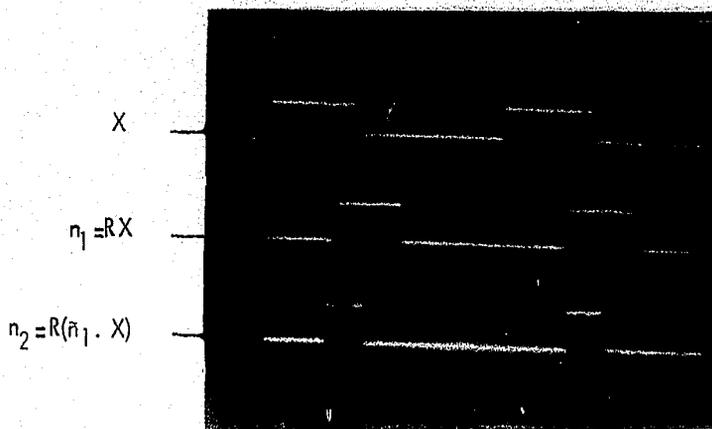
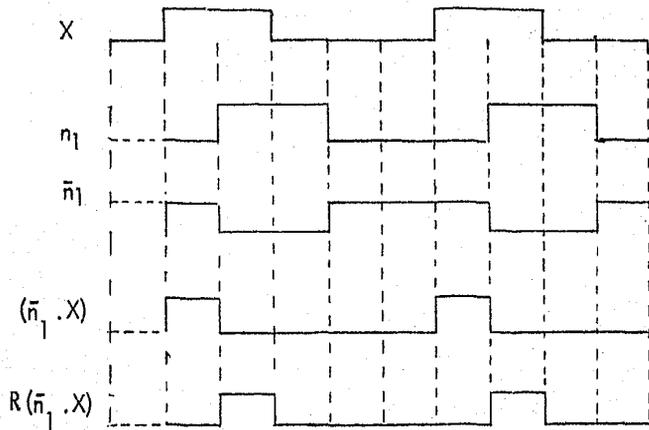
Es una función lógica que responde con un pulso, siempre que x prenda des --
pués de haber sido apagado.



$$n_1 = R x$$

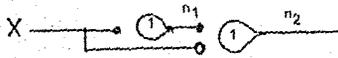
$$n_2 = R (\bar{n}_1 \cdot x)$$

$$n_2 = R (R \bar{n}_1 \cdot x)$$



b) Función apaga x.

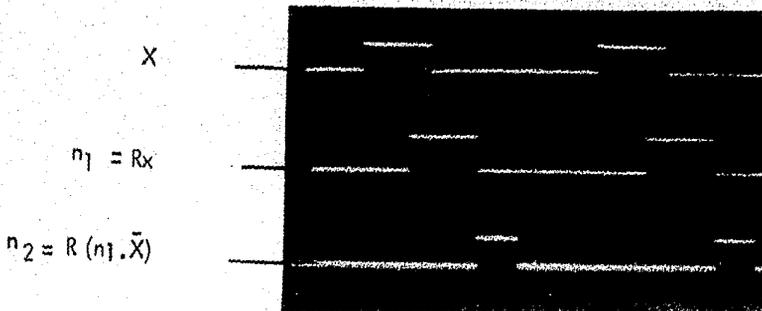
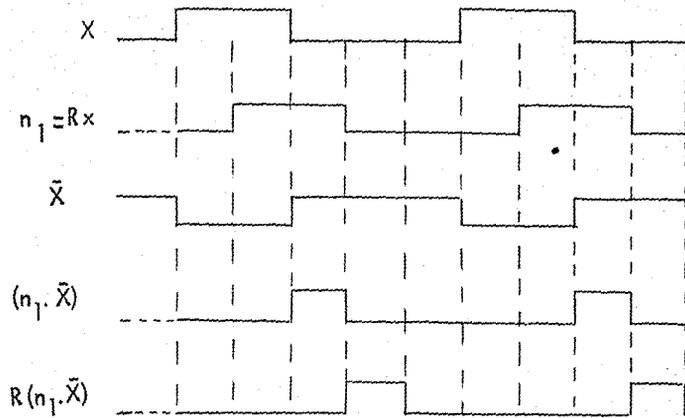
X se apaga después de haber sido prendido.



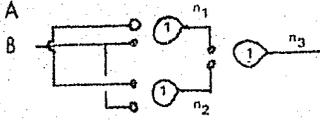
$$n_1 = Rx$$

$$n_2 = R(n_1 \cdot \bar{X})$$

$$n_2 = R(R \cdot N)X$$



111.- Experimentos con tres neuronas:

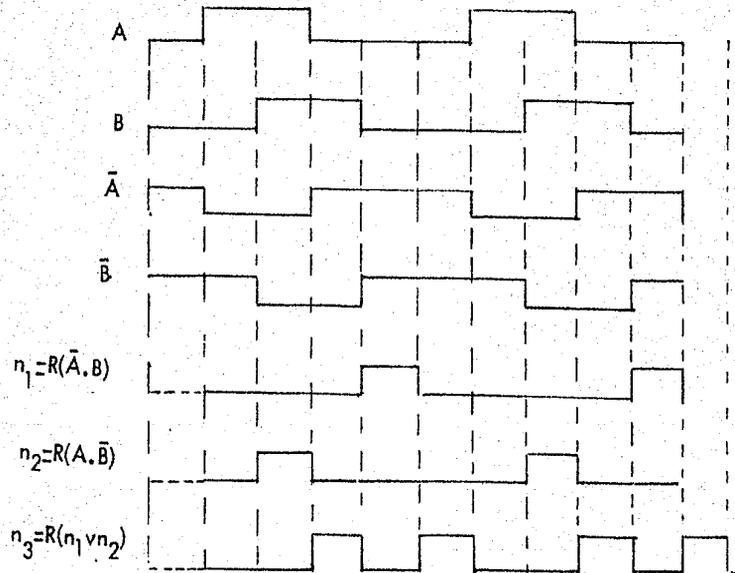
a) O exclusivo: $\bar{A}BvA\bar{B}$ con sus retardos respectivos.

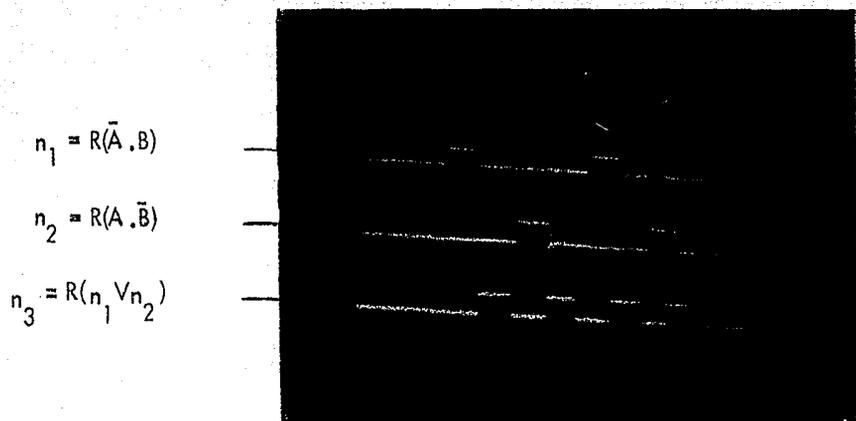
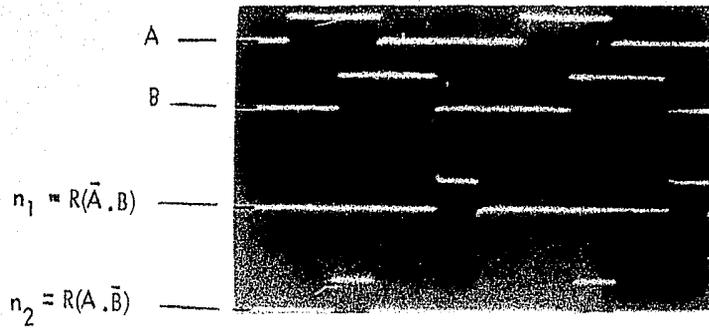
$$n_1 = R(\bar{A}, B)$$

$$n_2 = R(A, \bar{B})$$

$$n_3 = R(n_1 \vee n_2)$$

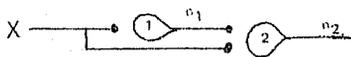
$$n_3 = R \left[R(\bar{A}, B \vee A, \bar{B}) \right]$$





c) Circuito que reconoce el patrón (11).

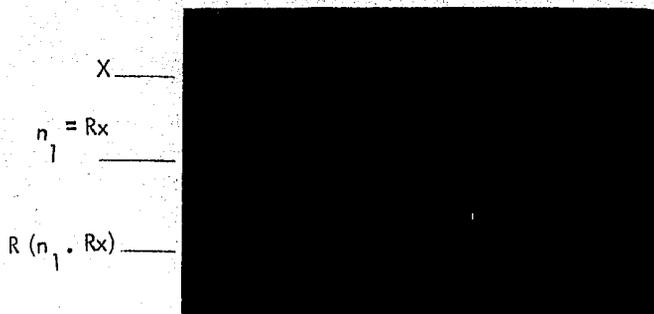
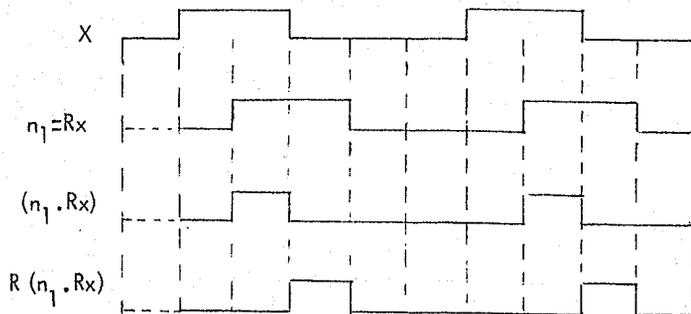
En cada ocasión que dicho patrón aparezca el circuito, dá un pulso de salida retardado.



$$n_1 = Rx$$

$$n_2 = R(n_1 \cdot X)$$

$$n_2 = R(R \cdot 1) X$$



CAPITULO VI

MODELO DEL SISTEMA NEURO-MOTOR

El propósito de éste trabajo es la simulación electrónica de un modelo teórico del sistema neuro-motor encontrado por la experimentación biológica por el efecto de diversas drogas sobre su funcionamiento. Este modelo se muestra en la fig. 6-1 donde se definen 3 funciones fundamentales del sistema nervioso sobre la moto-neurona:

a) Función directora, representado por J y A en la fig. 6-1 función moduladora representada por K , D , E . C) función de control de disparo representado por G . Las drogas que actúan en cada una de éstas zonas se mencionan en la fig. 6-1.

La realización electrónica del modelo se fundamenta en principio como habíamos mencionado en la lógica neuronal obteniendo con ésto la ventaja que el modelo pueda ser estudiado en forma determinística con éste formalismo matemático; definiendo en fórmulas lógicas sencillas la acción del sistema en general. Este modelo representado en lógica neuronal se muestra en la fig. 6-2, donde las neuronas B, C , se usan para obtener los mismos resultados observados en la realidad, la M simula el movimiento voluntario y la Q la modulación en el sistema, representados como generadores en el modelo electrónico.

Análisis del sistema neuro-motor por lógica neuronal y resultados obtenidos en el modelo electrónico.

De la figura 6-2, se puede deducir la siguiente ecuación para la neurona H (Motoneurona) utilizando para esto la lógica neuronal:

$$H = A.C.F. \vee (\bar{G} \vee \bar{E}). (AC \vee AF \vee CF) \vee \bar{G}.\bar{E}.(A \vee C \vee F)$$

Ecuación general de la motoneurona.

MODELO NEURONAL

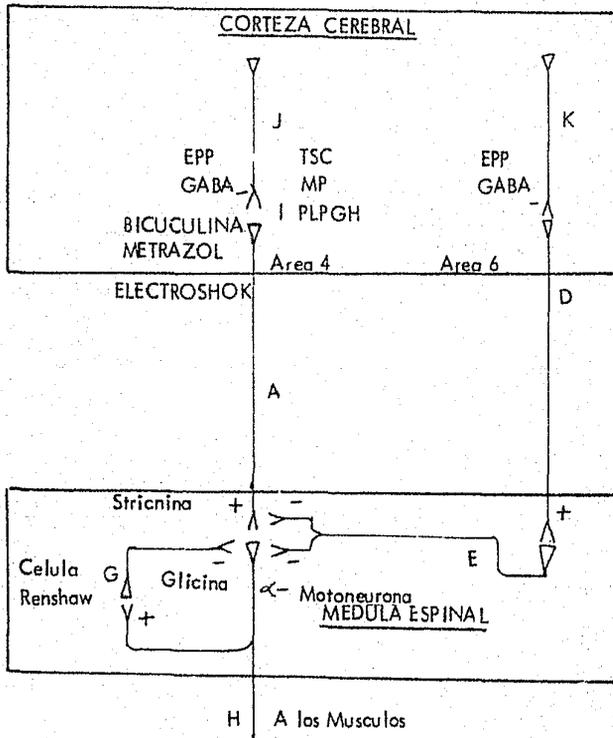


Fig. 6.1

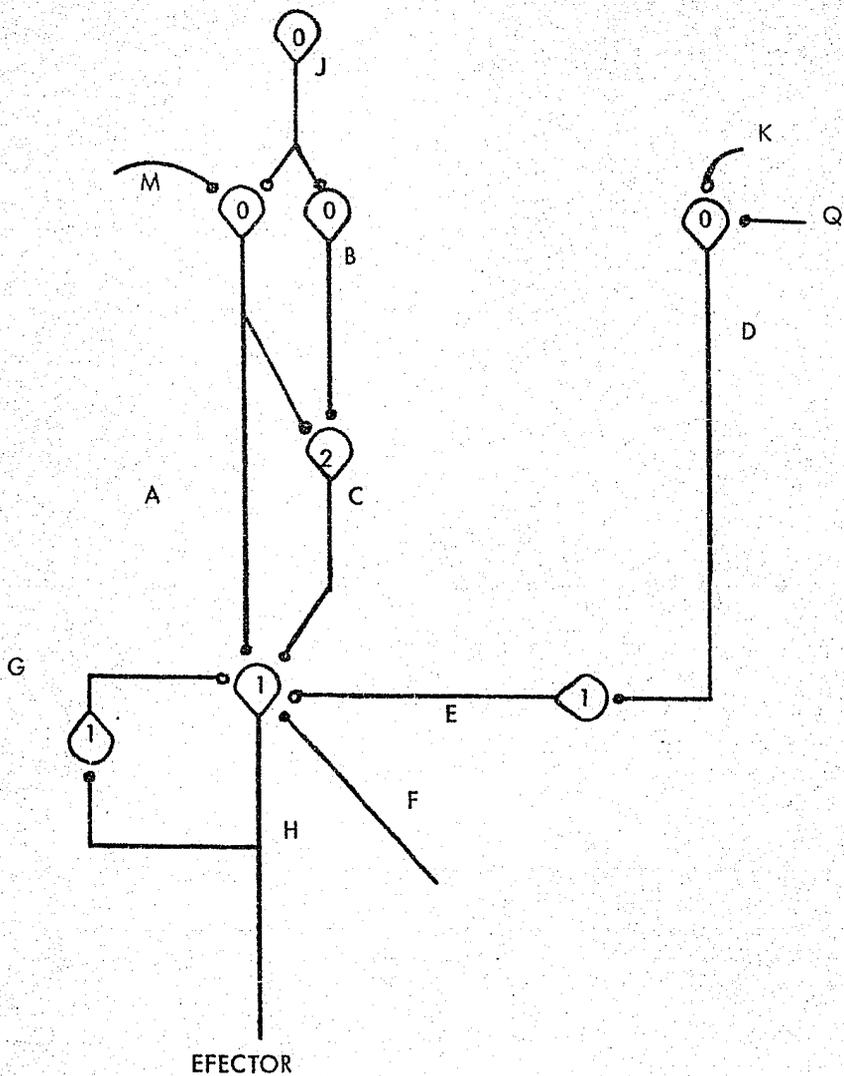


Fig. 6 - 2 MODELO SEGUN LA LOGICA NEURONAL

1 caso.- Estado normal (ninguna droga).

$$J = 1 \quad K = 0 \quad F = 1 \quad \text{por lo tanto,} \quad E = 1 \quad C = 0$$

Sustituyendo estos datos en la ecuación general recordando que la conjunción de X con 1 es X y su alternación es \bar{X} , asimismo la conjunción de X con 0 es 0 y su alternación es X.

$$X.1 = X \quad X.0 = 0$$

$$X\bar{1} = \bar{X} \quad X\bar{0} = X$$

Recordando estas características de la lógica neuronal, para el caso normal, la ecuación resulta:

$$H = A.\bar{G}$$

$$H = RM.\bar{G}$$

Este resultado se puede analizar por simple inspección de la figura 6-2, ya que E se anulará con F, C vale cero, por lo tanto H solo dependerá de M y de \bar{G} , donde M representa el movimiento voluntario simulado por un generador de pulsos como se ve en la figura 6-3 y G es la célula de Renshaw que actúa como realimentación negativa sobre la motoneurona, nótese que responde un tiempo después de H, regulando por lo tanto su frecuencia de disparo. (Ver. Fig. 6-3, 6-4, 6-5).

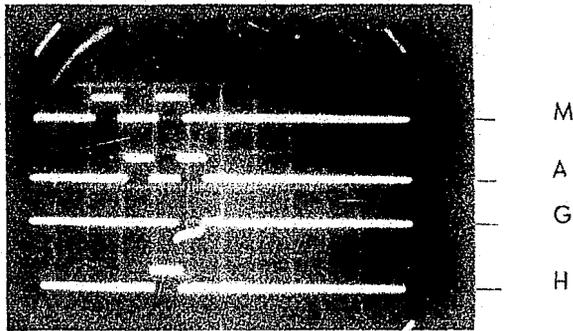


Fig. 6 -3 Simulación de condiciones normales; M: Movimiento voluntario, A: interneurona entre M y H, G: Neurona de realimentación.

H: Motoneurona.

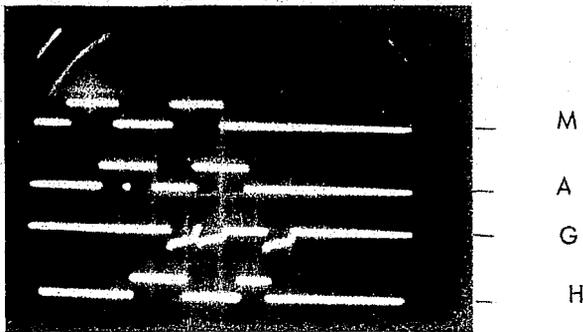


Fig. 6 - 4 condiciones normales, con diferente patrón en la entrada M.

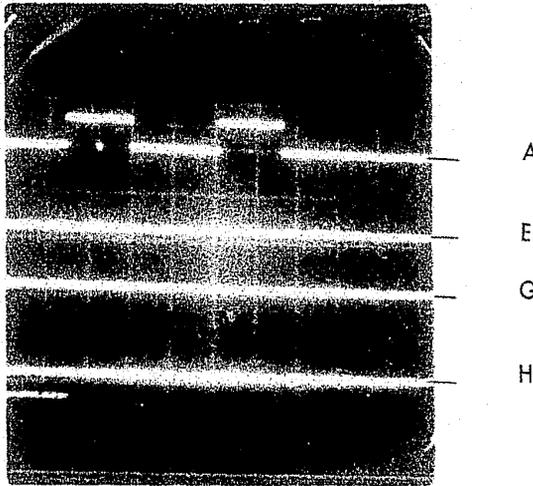


Fig. 6-7 Efecto de la combinación de las drogas Strychnina y EPP

5 Caso. - Dosis fuerte de Strychnina.

En este caso se simula eliminando la función de la neurona G y bajando el umbral de la neurona H, a cero, por lo que tendremos que :

$G = 0$, $U_H = 0$, $E = 1$, $C = 0$, para este caso es necesario encontrar otra fórmula para la motoneurona debido al cambio de umbral por lo que solo consideraremos las neuronas que tienen efecto sobre la misma, como se ve en la Fig. 6-8, encontrando la ecuación siguiente que muestra que H está en estado convulsivo.

Con esta ecuación se deduce que la respuesta de la motoneurona H, dependerá de A es decir el movimiento voluntario, pero sin la realimentación G, por esto, pueden -- producirse movimientos no coordinados o semi involuntarios, también habrá respuesta cuando deje de haber inhibición por parte de la neurona moduladora E.

Como ejemplo en la figura 6-6 con el patrón mostrado A se observa que el estado de G es "0" representado en la tercera línea de la Fig. 6-6; por lo que H dependerá solamente de A y E.

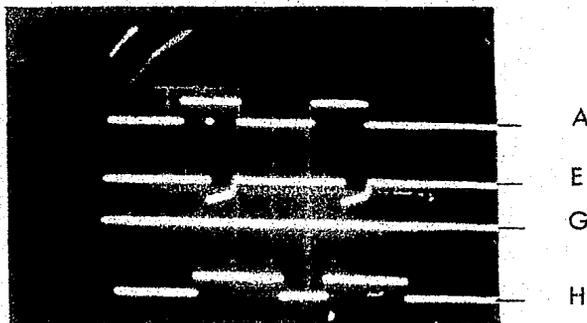


Fig. 6-6 Simulación de dosis débil de Stricnina, que elimina la modulación de G.

3 Caso Aplicación de la droga EPP.

En este caso solo afectará la neurona K, haciendo que esta funcione inhibiendo a la neurona D, teniendo por lo tanto: $K=1$, $F=1$, $C=0$, por lo que: $E=0$.

Sustituyendo estos datos en la ecuación general de la motoneurona, tendremos:

$$H = A.C.F \vee (\bar{G} \vee \bar{E}) - (A.C \vee A.F \vee C.F) \vee \bar{E}.\bar{G} (A \vee C \vee F)$$

$$H = 0 \vee 1 \cdot (A) \vee \bar{G}$$

$$H = A \vee \bar{G}$$

$$H = RM \vee \bar{G}$$

De esta ecuación se deduce que la respuesta de la motoneurona H depende del movimiento voluntario M y de la realimentación de la neurona G, notándose que la modulación ejercida por la neurona E ha desaparecido, debido al efecto de la droga sobre la neurona K. Esto produce una hiperexcitación en la motoneurona H.

4.- Caso.- Dosis débil de Stricnina y EPP combinados.

En este caso tenemos una combinación de los casos 2 y 3, por lo tanto sustituyendo estos datos en la ecuación general de la motoneurona, tendremos el caso especial de las convulsiones es decir:

$$H = 1$$

En la fotografía se muestra este caso, observando que G y E son cero y H es "1" todo el tiempo (Observar que el nivel cero de H está en la línea de puntos debajo de la línea gruesa de su respuesta en convulsiones)

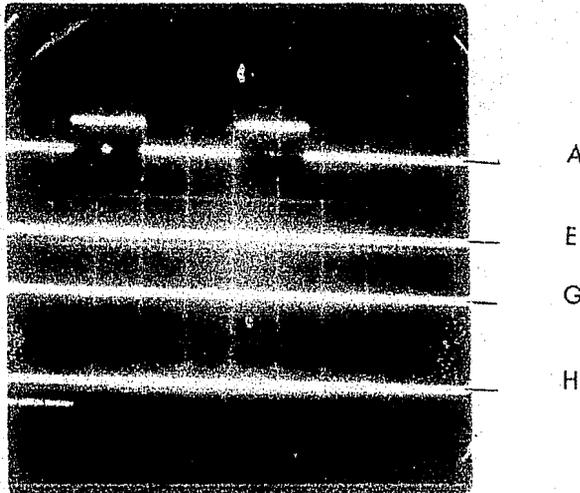


Fig. 6-7 Efecto de la combinación de las drogas Strychnina y EPP

5 Caso.- Dosis fuerte de Strychnina.

En este caso se simula eliminando la función de la neurona G y bajando el umbral de la neurona H, a cero, por lo que tendremos que :

$G = 0$, $U_H = 0$, $E = 1$, $C = 0$, para este caso es necesario encontrar otra fórmula para la motoneurona debido al cambio de umbral por lo que solo consideraremos las neuronas que tienen efecto sobre la misma, como se ve en la Fig. 6-8, encontrando la ecuación siguiente que muestra que H está en estado convulsivo.

$$H = 1$$

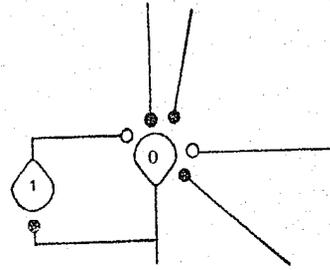


Fig. 6-8 La neurona H y sus incidentes.

En el ejemplo que se muestra en la Fig. 6-9 se ve que G es cero constantemente y que H está en convulsión (observese que el nivel cero está en la línea de puntos)

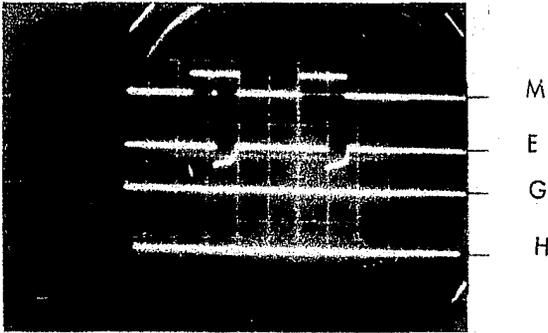


Fig. 6-9 Simulación de dosis fuerte de Stricnina.

6 Caso, Droga sobre J. (Bicoculina, PLPHG, Metrazol, Electroshok).

En este caso tendremos: $J=0$, $F=1$, $E=1$ por lo tanto $C=1$, $A=1$ sustituyendo estos datos en la ecuación general de la motoneurona tendremos convulsiones con la ecuación resultante:

$$H = ACF \vee (\bar{C}\bar{V}\bar{E}) \cdot (AC \vee AF \vee CF) \vee \bar{E} \cdot \bar{G} (A \vee C \vee F)$$

$$H = 1 \vee \bar{G} \cdot (1) \vee 0$$

$$H = 1$$

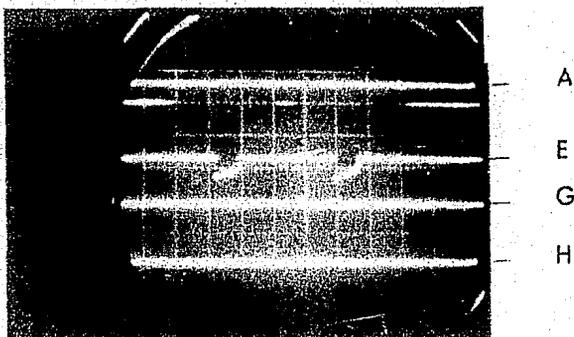


Fig. 6-10 Simulación de la droga sobre la neurona directriz J.

Observese en la Fig. 6-10 que A está en "1" constantemente (ver la línea de puntos del nivel cero), también H está en convulsiones constantemente, a pesar del efecto inhibitor de la realimentación G.

CONCLUSIONES:

Este trabajo surge como testimonio de la necesidad creciente en los estudiantes de las ciencias exactas, de alcanzar un contacto mas estrecho con los fenómenos de las ciencias de la vida, surge por la necesidad de humanizar a la técnica y por el intento de reintegrar al hombre consigo mismo y con la naturaleza.

Es intento a su vez el mostrar que la investigación interdisciplinaria es fundamental en la búsqueda del conocimiento ya que fusiona diferentes métodos, técnicas y conceptos creando un lenguaje común entre las ciencias de la vida y las ciencias exactas, favoreciendo la necesidad de formalizar a las primeras como humanizar a las segundas.

Se buscó establecer una metodología formal, que pudiera establecer la relación interdisciplinaria en una forma objetiva y práctica, propiciando con ello el desarrollo en la investigación del tema en estudio. Tema que fue deducido por una serie de investigaciones realizadas en el laboratorio de Bioquímica, sobre los transmisores sinápticos en el sistema nervioso, de donde surgió el modelo de un sistema neuro-motor, siendo acogida con entusiasmo la posibilidad de implementarlo electrónicamente.

La realización de dicho modelo, sigue lo mas formalmente posible, un método que intenta generalizar en forma sencilla la teoría general de su construcción, iniciándose con el modelo de la unidad neuronal y posteriormente el conjunto de neuronas, con la característica que dicho conjunto no se limita al modelo postulado, sino que puede combinarse en diferentes formas, pudiéndose con éstas combinaciones encontrar funciones elementales realizadas por el sistema nervioso, tanto a nivel de percepción, como de reconocimien

to de patrones, lo cual da al modelo un carácter mas universal de lo que inicialmente se había planeado.

Simultáneamente al modelo electrónico realizado, se usaron modelos matemáticos (Lógica Neuronal), modelos biológicos (Modelo postulado por Lab. de Bioquímica), para mostrar la objetividad del mismo y confirmar con ello los postulados de la investigación, no limitándose a la acción de una neurona, sino de mecanismos de acción fundamentales del sistema nervioso que han sido encontrados experimentalmente y que el modelo reproduce perfectamente.

Para mostrar objetivamente los efectos de la simulación, se procedió a la construcción de un brazo mecánico que actúa como efector del sistema realizado, permitiéndonos de ésta forma enseñar claramente la variación en el movimiento de acuerdo a la modificación de las variables que actúan en el sistema, siendo esto, una posibilidad extraordinaria para la educación a todo nivel mostrando mecanismos fundamentales del sistema nervioso en una forma sencilla y práctica, permitiendo que el alumno tenga un contacto directo con las variables fundamentales que lo mueven y pueda observar el efecto de su variación que él mismo modifica. Por otro lado se construyó un automata que actúa también como efector del sistema, definiendo el estado del músculo por el estado de excitación de la motoneurona, siendo también de un gran valor didáctico.

El modelo muestra objetivamente la acción postulada por la investigación, esclareciendo muchas ideas sobre su funcionamiento y postulando por otro lado nuevas hipótesis que buscarán confirmarse en la realidad, además nos permite percibir en una forma simplificada algunos de los mecanismos fundamentales que utiliza el sistema nervioso para de-

sarrollar sus actividades superiores.

Este modelo no supone bajo ningún aspecto simular la realidad tal cual es, sería demasiado presuntuoso que alguien pudiera decir ésto de un modelo, pero si muestra algunos de los fenómenos fundamentales del sistema nervioso. Tomando en consideración que solo se tomó en cuenta la capacidad transmisora de la neurona, no tomando en consideración su actividad plástica.

Para completar el modelo es necesario que ésta segunda característica neuronal sea tomada en cuenta, para lo cual haremos uso de los resultados experimentales encontrados en el laboratorio de bioquímica, que muestran que determinados estímulos pueden alterar parcial o permanentemente las propiedades de la neurona, postulándose que dichas variaciones pueden explicar algunos aspectos del aprendizaje y de la memoria, que al implementarse electrónicamente intenta confirmar dichas hipótesis.

Se establece por tanto un método de investigación, donde un modelo y su grado de complejidad dependen de los datos encontrados en la experimentación, estimulando a la misma planteándole nuevas preguntas y deduciendo nuevas hipótesis, obteniéndose en ésta relación inter-disciplinaria, una técnica que nos abre grandes posibilidades en el conocimiento del sistema nervioso y por tanto del ser humano.

BIBLIOGRAFIA.

1) E. B. Babsky, B.I. Khodorov, G.I. Kositsky, A.A. Zubkov.

Human Physiology.

Mir Publishers.

2) Bartee.

Digital computer fundamentals.

McGraw Hill Kugakusha. 1972.

3) Eccles J.C.

The physiology of nerve cells.

Jhon Hopkins Press 1957.

4) Eccles J.C.

The phisiology of synapses.

Springer verlag-1964.

5) Grey P.E., Searle C.

Electronic principles.

Wiley International. 1967.

6) Guzmán C., Martínez, Almanza y García.

An Electronic Model of the neuron.

Bol. Estud. Méd. Biol., Mex. 27: 51-59, 1971.

7) Hubbard, Llimus & Questel

Electrophysiological Analysis of Synaptic transmission Anold (1969).

8) Katz B.

Nerve muscle and synapses.

McGraw Hill. 1966.

9) Kurz :

Apuntes sobre Seminario Impartido.

10) MacGrecor and Oliver R.M.

A General-Purpose Electronic model for arbitrary configuration of neurons.

11) McVrogon E.P.

Improved neuron models.

National Electronic conference. Oct. 9-11

12) Medina A.

Time Dependent Logic.

Comunicaciones Tecnicas CIMASS 1972.

13) Millman y Taub.

Circuitos de pulsos digitales y de conmutación.

McGraw Hill 1971.

14) Putzrah L. and Martin T.

Speech recognition by neural networks.

Proc. Nat. Electronics conference 17, 1961.

15) Reiss W.

Proc. American Federation of Information Theory, Spring Joint computer conference.21-171.

and Belove.

Electronic Circuits discrete and integrated.

McGraw Hill Kogakusha.

17) Tapia R. and Perez de la Mora.

Anticonvulsant effect of 5-Ethyl, 5-Phenyl, 2-Pyrrolidionone and its possible relationship to 8-Aminobutyric Acid dependent inhibitory mechanisms.

18) Tapia R.

Seminario sobre Sinapsis neuronal.

ESTE TRABAJO SE IMPRIMO EN LOS TALLERES
DE GUADARRAMA IMPRESORES, S. A. AVENIDA
CUAUHTEMOC 1201, COL. VERTIZ NARVARTE
MEXICO 13, D. F., TEL. 559-22-77 CONTRES LINEAS.