



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

MAESTRÍA EN CIENCIAS (NEUROBIOLOGIA)

INSTITUTO DE NEUROBIOLOGIA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE HARDWARE Y SOFTWARE PARA EL  
ENTRENAMIENTO DE PRIMATES NO HUMANOS EN UNA TAREA DE  
DISCRIMINACIÓN DE OBJETOS POR MEDIO DEL TACTO

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

ING. GIL ARTURO BARRIOS DEL VILLAR

TUTOR PRINCIPAL

DR. VICTOR HUGO DE LAFUENTE FLORES, INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

DR. FERNANDO ALEJANDRO BARRIOS, INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

DR. GERARDO ROJAS PILONI, INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

MÉXICO, D. F. JUNIO, 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

Universidad Nacional Autónoma de México  
Instituto de Neurobiología

Los miembros del Comité Tutorial certificamos que la tesis elaborada por: Gil Arturo Barrios del Villar, cuyo título es: “Desarrollo de un sistema de hardware y software para el entrenamiento de primates no humanos en una tarea de discriminación de objetos por medio del tacto” se presenta como uno de los requisitos para obtener el grado de Maestría en Ciencias (Neurobiología) y cumple con los criterios de originalidad y calidad requeridos por la División de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Firma

Presidente

Dr. \_\_\_\_\_

Secretario (Tutor)

Dr. \_\_\_\_\_

Vocal

Dr. \_\_\_\_\_

Suplente

Dr. \_\_\_\_\_

Suplente

Dr. \_\_\_\_\_

Aprobado por el Comité Académico

\_\_\_\_\_

Coordinador del Programa

## DEDICATORIA

A mi padre.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Víctor Hugo de Lafuente por liderar el proyecto y proporcionar su tutoría.

A los miembros del comité tutor: Dr. Fernando Alejandro Barrios y Dr. Gerardo Rojas Piloni por su tutoría y retroalimentación a lo largo del desarrollo del proyecto.

Al técnico del laboratorio B-05 Edgar Bolaños por su asistencia técnica, además de diseñar e implementar el circuito del sensor por luz infrarroja.

Al técnico del laboratorio B-15 Luis Prado, por proporcionar su diseño del circuito de recompensa en el cuál fue basado el utilizado en este trabajo.

A los miembros del laboratorio B-05, Raúl Hernández y Eduardo Rojas por estar involucrados activamente en el proyecto aportando ideas, ayudando a implementar diversos aspectos técnicos y en el entrenamiento del sujeto de estudio.

Al resto de los miembros del laboratorio B-05 por su asistencia en el proyecto además del cuidado del animal.

A la Unidad de Enseñanza del Instituto de Neurobiología y a la biblioteca de la UNAM campus Juriquilla.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Becario No: 486366

A la Dirección General de Estudios de Posgrado de la UNAM

Número de cuenta: 513003129

## RESUMEN

Uno de los principales retos en el estudio de la discriminación de objetos en primates no humanos ha sido el diseño de un sistema de entrenamiento conductual que permita entrenar monos en una tarea de este tipo. No existen en la literatura antecedentes de un sistema que permita presentar objetos de forma automatizada. En este trabajo, se diseñó y construyó un sistema de entrenamiento conductual que permite entrenar monos Rhesus en una tarea de discriminación bimodal (visual y somatosensorial) de objetos utilizando un brazo robótico, sensores de tacto e infrarrojos además de un sistema de control automático.

La tarea consiste en mostrar aleatoriamente un objeto a un mono Rhesus, el cual ante la aparición de un estímulo visual en forma de una pantalla de color blanco procede a tocarlo. Posteriormente, el mono identifica el objeto y responde tocando una de varias opciones en una pantalla táctil las cuales son de diferentes colores, cada objeto debe ser asociado con un color en particular. La tarea también contiene un elemento de recompensa asociada con las respuestas correctas. La presentación del objeto, detección de tacto y posterior entrega de recompensa se realizan de forma automática. Además, el sistema permite monitorear la conducta del mono y seguir su desempeño en tiempo real.

Se demostró el funcionamiento del sistema por medio del entrenamiento conductual de un mono Rhesus en una tarea de discriminación de objetos. El desempeño del mono para discriminar aumentó con el tiempo desde el azar hasta más del ochenta por ciento de respuestas correctas utilizando hasta cuatro objetos distintos. Para la demostración del sistema se utilizó una tarea de discriminación de objetos utilizando dos modalidades sensoriales simultáneamente, la vista y el tacto. El sistema es altamente adaptable, ya que es posible entrenar monos en la misma tarea, pero utilizando únicamente información táctil.

## SUMMARY

One of the main challenges in the study of object discrimination in non-human primates is the absence of an appropriate behavioural training system that enables researchers to train monkeys in a task of this kind. No fully automated training systems similar to the one presented in this work have been reported.

A behavioural training system that allows the training of Rhesus monkeys in a bimodal (visual and somatosensory) object recognition task was successfully developed. This system uses a robotic arm, touch and infrared sensors as well as an automatic control system.

The task consists in randomly presenting an object to a Rhesus monkey. The monkey proceeds to touch it after the apparition of a blank screen. Afterwards, the monkey identifies the object and responds by touching one of several coloured areas on a touchscreen, each associated with a particular object. Should the monkey answer correctly, water is delivered as reward.

Object presentation, touch sensing and subsequent reward delivery are automated. Furthermore, the system is able to monitor the monkey's performance automatically and in real time. The operation of the system was tested by training a monkey in this task. The monkey's performance increased with time from chance up to eighty per cent of correct answers and using up to four different objects. For this demonstration a bimodal object recognition task was used (visual and tactile). However, the system is highly adaptable since it is possible to train monkeys in the same task, but using somatosensory information only. To achieve this, a physical barrier between the monkey and the area where the object is held for its exploration must be placed. This barrier would darken progressively until the monkey is able to identify the objects using touch alone.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. ANTECEDENTES .....	12
3. JUSTIFICACIÓN .....	17
4. OBJETIVOS .....	18
5. SUJETOS, MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
5.1. SUJETO EXPERIMENTAL.....	19
5.2. DESCRIPCIÓN DE LA TAREA .....	19
5.3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO CONDUCTUAL ....	21
5.3.1. DESARROLLO DE UN SENSOR TÁCTIL CAPACITIVO .....	22
5.3.2. DESARROLLO DE UN SENSOR POR LUZ INFRARROJA .....	23
5.3.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE RECOMPENSA.....	23
5.3.5. PROGRAMACIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO PARA LA MANIPULACIÓN DE LOS OBJETOS.....	24
5.3.6. PROGRAMACIÓN DE LA TAREA E INTEGRACIÓN DEL SISTEMA .....	25
5.3.7. PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA .....	27
5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	31
6. RESULTADOS .....	32

6.1. ENTRENAMIENTO CONDUCTUAL DE UN MONO RHESUS EN UNA TAREA DE DISCRIMINACIÓN DE OBJETOS .....	32
6.1.1. ENTRENAMIENTO PROCEDURAL DE LA TAREA .....	32
6.1.2. ENTRENAMIENTO ASOCIATIVO DE LOS OBJETOS CON DISTINTOS COLORES .....	32
6.1.3. DISCRIMINACIÓN DE MÁS DE DOS OBJETOS .....	37
6.1.4. ANÁLISIS DEL TIEMPO DE RESPUESTA .....	39
6.1.5. ALEATORIZACIÓN DE LA POSICIÓN DE LAS ÁREAS DE RESPUESTA .....	41
6.1.6. VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO CONDUCTUAL .....	43
7. DISCUSIÓN.....	45
8. CONCLUSIONES.....	51
REFERENCIAS .....	52
LISTA DE FIGURAS.....	57
LISTA DE TABLAS.....	59
APÉNDICES.....	60
APÉNDICE A. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR TÁCTIL CAPACITIVO .....	60
APÉNDICE B. DISEÑO DEL SENSOR DE PRESENCIA POR LUZ INFRARROJA .....	63
APÉNDICE C. DISEÑO DEL CIRCUITO PARA EL SISTEMA DE RECOMPENSA.....	64



APÉNDICE D. PROGRAMACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO E	
INTERFAZ DE COMUNICACIÓN CON MATLAB.....	66
APÉNDICE E. IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA EN EXPO.....	70

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio del reconocimiento háptico de objetos es escaso. Si bien, existen múltiples estudios electrofisiológicos que investigan la percepción de la orientación en las cortezas somatosensoriales primaria y secundaria (Bensmaia et al., 2008; Fitzgerald et al., 2006); no existe un estudio que investigue el reconocimiento de la forma de los objetos utilizando el sistema somatosensorial.

La investigación de este proceso perceptual se ha realizado únicamente utilizando una tarea bimodal, visual y somatosensorial (Gardner et al., 2002). De tal forma que la contribución del sistema somatosensorial en el reconocimiento de objetos permanece sin vislumbrarse, ya que en estos estudios, el reconocimiento de los objetos pudiera realizarse meramente con el sistema visual.

La principal razón de la exigüidad del estudio de este proceso sensorial y asociativo complejo es la dificultad técnica. No existe, hasta el momento, un sistema de entrenamiento conductual para una tarea de discriminación táctil de objetos. Esto se debe principalmente a que los requerimientos técnicos de un sistema como el mencionado anteriormente son complejos. Es necesario un sistema completamente automatizado para evitar que el investigador intervenga en la tarea y pudiese influir en el comportamiento del animal. La automatización permite también que el investigador coloque al animal en una cámara aislada de cualquier tipo de ruido externo, en caso de que desee realizar registros electrofisiológicos. Es por ello que, el objetivo del presente trabajo fue diseñar un sistema de entrenamiento conductual, completamente automatizado, que permita entrenar a un mono Rhesus en una tarea de discriminación táctil de objetos. El sistema desarrollado hace uso de un brazo robótico, el cual permite manipular los objetos con gran flexibilidad, además de permitir variar el ángulo del objeto. Adicionalmente, se hace uso de una variedad de sensores, infrarrojos y de tacto, y de un avanzado sistema de control utilizando MATLAB y Expo Psychophysics que permiten llevar un control de flujo adecuado de la tarea de exploración táctil, todo sin la necesidad que el investigador intervenga. El sistema de entrenamiento incluye también

un programa de análisis de datos en tiempo real, a través del cual el investigador puede monitorear el desempeño del sujeto durante una sesión de entrenamiento.

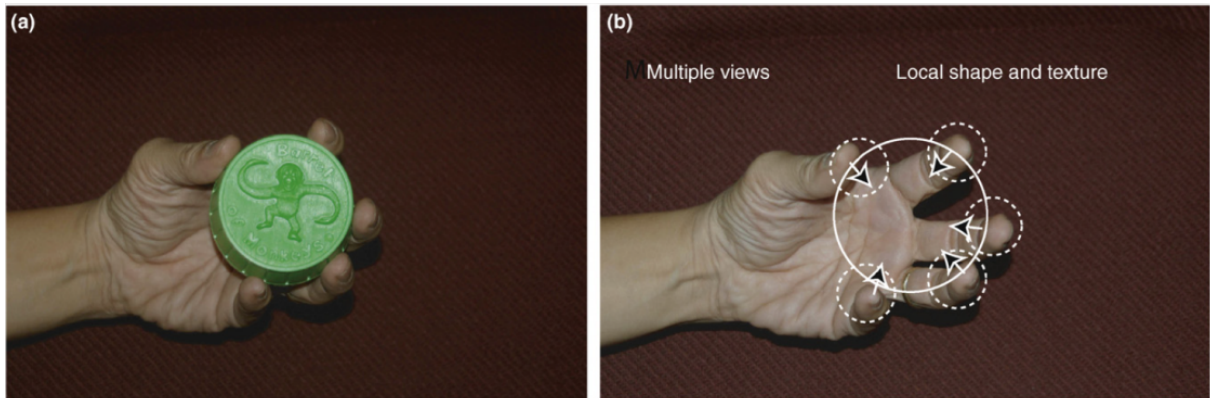
Finalmente, en este trabajo se puso a prueba dicho sistema por medio del entrenamiento de un mono Rhesus en una tarea de discriminación de objetos.

El presente proyecto representa un avance importante en el campo del estudio de los sistemas sensoriales y motores ya que sienta las bases técnicas necesarias para el entrenamiento automatizado de primates no humanos en una tarea de discriminación táctil de objetos, lo cual permanecía irrealizable debido a su dificultad técnica.

## 2. ANTECEDENTES

La información táctil es percibida en el sistema nervioso periférico a través de los mecanorreceptores y propioceptores de la piel y husos musculares. Se sabe que la información de textura y forma en 2D es transmitida por las aferentes de adaptación lenta tipo (SA1), las vibraciones de baja frecuencia e información sobre movimiento por las aferentes de adaptación rápida (RA), las aferentes de Pacini (PC) transmiten información sobre vibraciones de alta frecuencia, y las aferentes de adaptación lenta tipo 2 (SA2) son responsables de transmitir la información relacionada con el estiramiento de la piel, además de enviar información sobre conformación de la mano. Sin embargo, se sabe poco acerca de cómo es procesada esta información cutánea en conjunto con la información propioceptiva, en el sistema nervioso central para poder percibir y discriminar objetos en tercera dimensión.

La hipótesis imperante es que la información de las aferentes cutáneas primarias y la información propioceptiva de las articulaciones y músculos se utilizan en conjunto para poder determinar la forma y tamaño de un objeto (Hsiao, 2008). Es claro que la información de mecanorreceptores y propioceptores por separado no pueden dar una representación completa de un objeto tridimensional (figura 1). Como puede apreciarse en la figura 1, únicamente colocar la mano en una conformación dada no es suficiente para percibir o formar la representación de un objeto. De igual manera, si se estimula separadamente cada uno de los dedos, pero con la mano completamente extendida, no se podría saber la forma redonda del objeto.



Current Opinion in Neurobiology

Figura 1. La representación de un objeto tridimensional requiere de los dos tipos de información: De los mecanorreceptores para percibir las características de forma y textura locales de distintos puntos de un objeto e información de la conformación de la mano para percibir el tamaño y forma de un objeto. Tomada de Hsiao (2008).

El primer nivel de procesamiento cortical de información táctil se realiza en la corteza somatosensorial primaria (SI). Bensmaia *et al.* (2008) encontraron neuronas en las áreas 3b y 1 que presentan sintonización a la orientación. Los autores teorizan que esta propiedad es integrada en SI a partir de la disposición de los campos receptivos de las neuronas receptoras (SA y RA) de tal forma que un estímulo orientado a cierto ángulo activa una serie de campos receptivos ordenados con la misma orientación. Esto concuerda con la teoría clásica de sintonización a la orientación en VI (Hubel y Wiesel, 1962). Las neuronas de SI también presentan propiedades de selectividad a diferentes texturas y frecuencias. (Romo *et al.*, 1998). Sin embargo, los campos receptivos de las neuronas en el área 3b de SI son pequeños -alrededor de 1 cm<sup>2</sup>- (DiCarlo y Johnson, 2000) y esta área juega un papel en la detección y procesamiento de formas en 2D, así como texturas y otras propiedades locales. Sin embargo, no es presumible que jueguen un papel en la representación de objetos tridimensionales que abarquen campos receptivos con áreas mayores -desde varios dígitos a regiones amplias de la mano- (Hsiao, 2008).

Fitzgerald *et al.*, (2004) crearon un mapa somatotópico de SII y encontraron aquellas neuronas con campos receptivos en la mano y los dígitos del mono Rhesus (figura 2).

Realizando estimulaciones con barras metálicas orientadas verticalmente que en su parte inferior, tienen una ranura la cual está orientada en ángulos distintos. Encontraron que una gran cantidad de neuronas en la representación de la mano de SII presentan sintonización a la orientación. Asimismo, encontraron que los campos receptivos de éstas no se limitan a un área pequeña o incluso a un dígito, sino que abarcan áreas grandes. Por ejemplo la neurona cuya actividad eléctrica está representada en la figura 3 es responsiva a orientaciones verticales en los dígitos 2 y 3. El hecho de que distintas partes de la mano tengan selectividad a la misma orientación en una misma neurona hace pensar que células de SII podrían funcionar como ‘detectores de características’ de objetos. Una neurona con sintonía a estímulos horizontales en varias falanges de los dedos podría funcionar como un detector de orillas, por ejemplo, de una mesa. (Fitzgerald *et al.*, 2006).

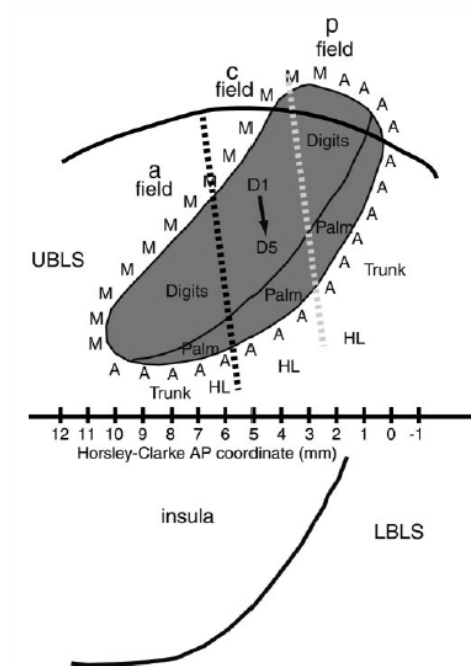


Figura 2. Representación de la mano y los dígitos en la corteza somatosensorial secundaria (SII) de un mono Rhesus. Tomado de Fitzgerald *et al.* (2004).

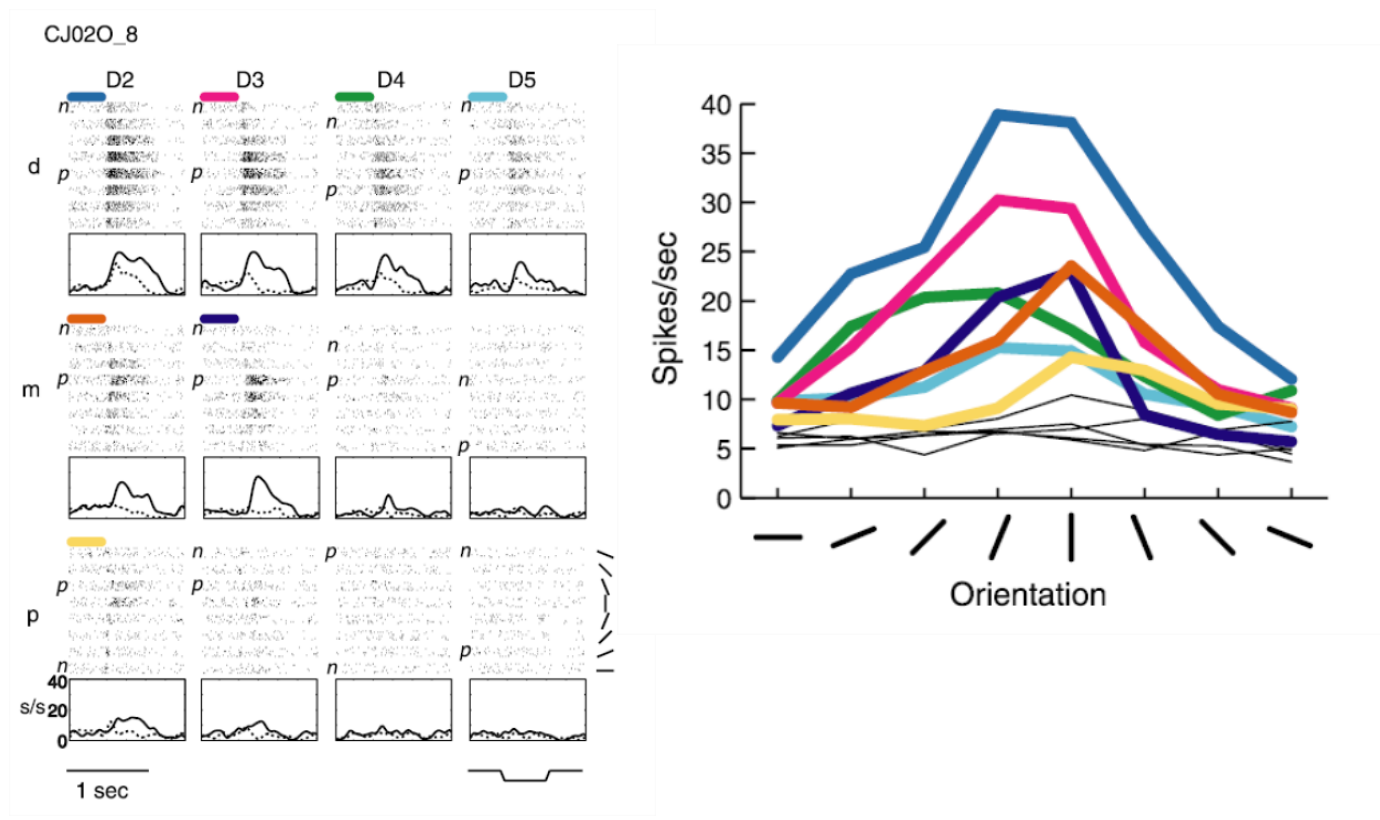


Figura 3. Actividad eléctrica de una neurona registrada en SII. Izquierda: Gráfica de respuesta de la neurona ante la estimulación con barras a distintas orientaciones en 4 dígitos y 3 diferentes falanges (distal, medial y proximal). Cada punto representa un potencial de acción. Derecha: Tasa de disparo de la misma neurona en función de la orientación para cada uno de los dígitos. Tomado de Fitzgerald et al. (2006).

Es así como las neuronas de SII pudiesen extraer las diferentes características de los objetos. No obstante, para poder identificar un objeto dado, se debe de comparar esta información de forma, tamaño y orientación con representaciones neuronales de objetos existentes. En este sentido, teóricamente, existen neuronas que son selectivas a formas específicas y complejas similares a las encontradas en las cortezas visuales.

En un estudio de *Gardner et al. (2002)* se encontraron neuronas que responden únicamente a un tipo de objeto (rectangular o esférico) (Figura 4). Sin embargo, en el estudio de Gardner, los monos podían observar los objetos antes de realizar la prensión, por lo que esta activación a objetos específicos es facilitada por el sistema visual para preparar el movimiento de sujeción. Además la posición de los objetos

estaba fija y no había variabilidad en el ángulo de presentación. A la fecha no se conocen neuronas que presenten este patrón de activación a partir de información somatosensorial y propioceptiva únicamente.

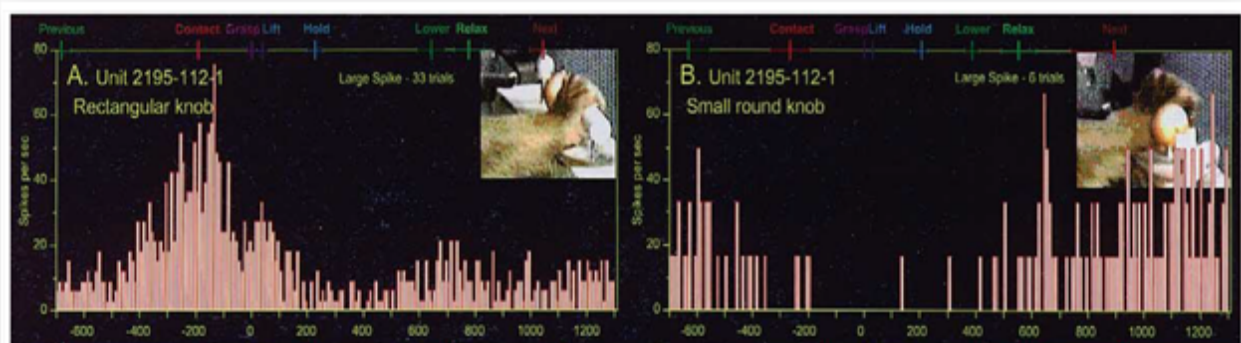


Figura 4. Tasa de disparo (espigas por segundo) registrada en una neurona del área 7 (corteza intraparietal anterior) que responde selectivamente a objetos rectangulares (izquierda), pero no a objetos esféricos (derecha). Tomada de Gardner et al. (2002).

La discriminación activa de objetos tridimensionales ha sido investigada utilizando resonancia magnética funcional en humanos (Stoeckel et al., 2004; Stoeckel et al., 2003; James, 2002). Se ha encontrado que el área intraparietal anterior está altamente implicada en la discriminación de objetos por medio del tacto (Rojas, 2013). Sin embargo, no existe ningún estudio electrofisiológico que encuentre resultados análogos en monos. Los estudios electrofisiológicos existentes se limitan, como se mostró anteriormente, a estudiar diferentes propiedades de los objetos, pero no como es que esta información se integra para reconocer un objeto tridimensional en particular.

Basándonos en los datos previamente presentados, se tomó la decisión de diseñar e implementar un sistema de entrenamiento conductual que permita la realización de este tipo de estudios.



### 3. JUSTIFICACIÓN

Dada la complejidad técnica de entrenar a un mono Rhesus en una tarea de discriminación táctil de objetos complejos en tercera dimensión, no existen estudios en primates no-humanos que estudien este proceso sensorial. Este trabajo posibilitará, por primera vez, el entrenamiento de monos en una tarea de este tipo, lo cual abrirá las puertas para estudios conductuales y electrofisiológicos de este fenómeno y representa un paso adelante en el estudio de los sistemas sensoriales y motores.

El sistema de entrenamiento conductual desarrollado para el presente trabajo resuelve un reto tecnológico importante y cubre una carencia en el estudio de la discriminación táctil de objetos. Es el primer sistema que permite entrenar monos en una tarea de discriminación de objetos tridimensionales de forma automatizada. La automatización permitirá realizar estudios electrofisiológicos de discriminación de objetos tridimensionales en primates no humanos. Por lo tanto, a futuro, ayudará a vislumbrar el papel que juega la corteza intraparietal anterior en el reconocimiento táctil de objetos, además de dar más información sobre el procesamiento de este fenómeno en las cortezas somatosensoriales.

#### 4. OBJETIVOS

- Desarrollar un sistema de entrenamiento conductual automatizado que permita el entrenamiento de monos Rhesus (*Macaca Mulatta*) en una tarea de discriminación de objetos que permita: (1) presentar objetos tridimensionales de formas complejas aleatoriamente, (2) detectar cuando el sujeto toque el objeto, (3) medir el tiempo de respuesta (4) reforzar la tarea mediante una recompensa y (5) monitorear en tiempo real el desempeño conductual.
- Entrenar a un mono Rhesus en una tarea de discriminación de objetos visual y somatosensorial mediante el sistema automatizado de entrenamiento conductual desarrollado. Cuantificar la identificación de cuatro objetos distintos y demostrar que existe un desempeño en dicha identificación significativo por arriba del azar.

## 5. SUJETOS, MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. SUJETO EXPERIMENTAL

Se utilizó un mono Rhesus (*Maccaca mulatta*) macho de alrededor de 4 años de edad, el sujeto se mantuvo en un ciclo luz/obscuridad de 12 horas, con alimentación *ad libitum* y consumo de agua *ad libitum* previo al entrenamiento. La privación de agua se inició una semana antes del entrenamiento. En condiciones normales se determinó que el promedio de consumo diario es de alrededor de 200 ml, por lo que se administró esa cantidad de agua durante cada sesión de entrenamiento. Todos los protocolos y procedimientos experimentales se realizaron de acuerdo a lo establecido por el comité de bioética del Instituto de Neurobiología de la UNAM.

### 5.2. DESCRIPCIÓN DE LA TAREA

La tarea consiste en la exploración activa de objetos tridimensionales complejos formados por la unión de esferas de aluminio de 2.5 cm de diámetro cada una. Algunos de los objetos estaban formados por 4 esferas, otros más por 6, la presentación de uno u otro objeto fue aleatoria, el uso de distinto número de esferas no fue analizada como una variable ya que no se consideró en el diseño inicial de la tarea. Se escogió este diseño debido a que con combinaciones de esferas colocadas en distintas posiciones se puede generar una gran variedad de figuras distintas. La figura 5, muestra un modelo de los objetos utilizados durante entrenamiento.

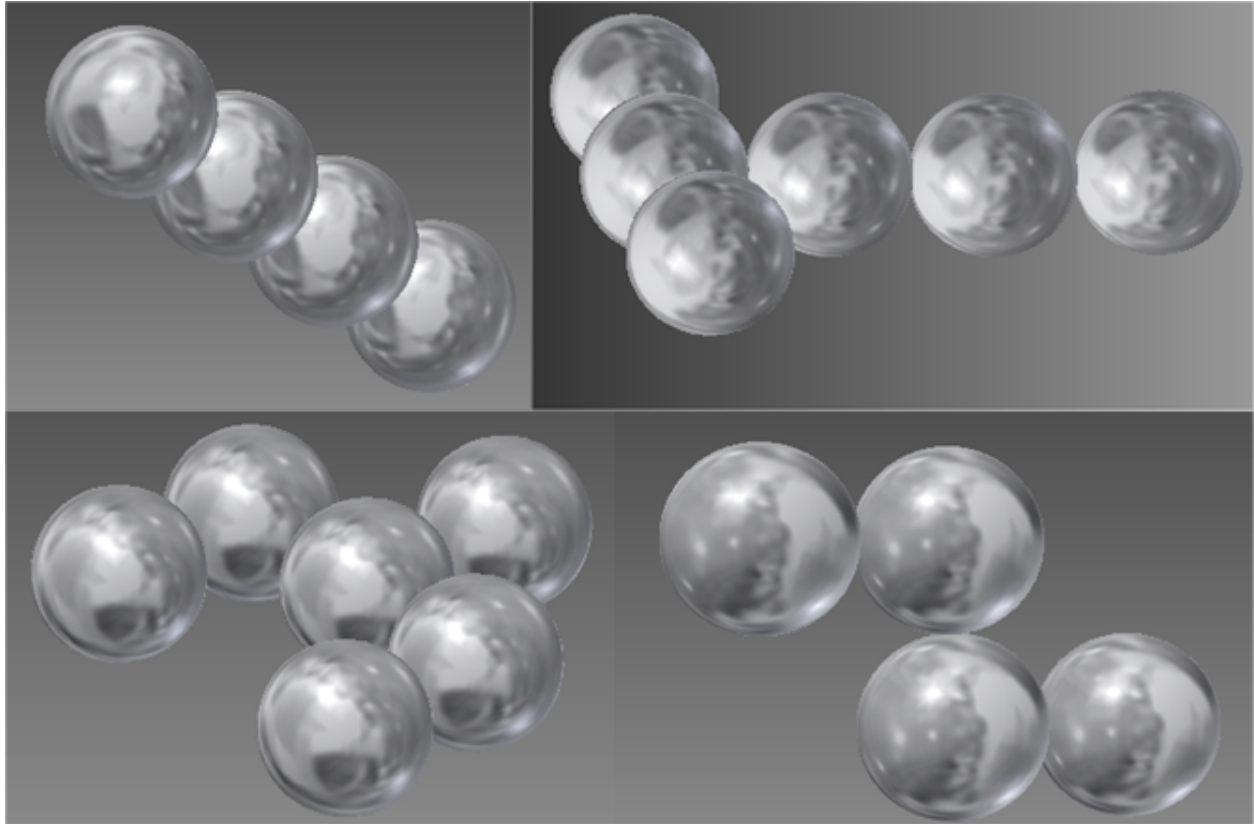


Figura 5. Objetos utilizados durante el entrenamiento.

El mono es capaz de controlar cuándo inicia un ensayo. Para esto tiene que colocar su mano derecha sobre una agarradera que cuenta con un emisor de luz infrarroja y un sensor. Cuando el mono coloca su mano, es señal de que el ensayo debe comenzar.

Posteriormente se selecciona un objeto aleatoriamente y se manda el comando a un brazo robótico para que tome el objeto seleccionado de su posición inicial y lo aproxime a una distancia cercana a la mano del mono. Con el objeto en posición se muestra una pantalla blanca, que es el estímulo que indica al mono que puede tocar el objeto. Así, el mono toca el objeto y esto es detectado por medio de un sensor táctil capacitivo y se pasa a la siguiente fase.

Durante la fase siguiente se muestran en la pantalla táctil las opciones de respuesta, que son cuadros de las mismas dimensiones pero de distintos colores. Cada color corresponde a un objeto distinto. El mono coloca su mano sobre la opción seleccionada

y la computadora determina si es correcta, en cuyo caso se abre una válvula electromecánica que permite el paso de una pequeña cantidad de agua por una manguera hasta una boquilla de donde el mono puede beberla. Se proporcionaron 2 mililitros al inicio del entrenamiento, 1 mililitro en las sesiones subsecuentes y se redujo hasta 0.7 con el objetivo de que se realizaran más ensayos con el mismo consumo, 200 mililitros totales. El mono se encuentra privado de agua, por lo que la administración de esta como resultado de un ensayo correcto es un reforzador positivo. La figura 6 muestra al mono durante las distintas etapas de ejecución de la tarea.

### 5.3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO CONDUCTUAL

El sistema de entrenamiento conductual está formado por los siguientes componentes:

- Computadora A: Esta computadora controla el flujo de la tarea, recibe las señales de entrada de los sensores y presenta los diferentes estímulos en la pantalla.
- Computadora B: Esta computadora se utiliza para el control del brazo robótico así como para codificar las coordenadas de la pantalla táctil. También selecciona los objetos aleatoriamente y evalúa la respuesta del mono.
- Brazo robótico: Utilizado para sujetar los objetos y presentarlos al mono para su exploración.
- Sensor táctil capacitivo: Para detectar cuando el mono esté explorando el objeto.
- Sensor de luz infrarroja: Para detectar cuando el mono coloque su mano sobre la agarradera, que es la señal de inicio del ensayo.
- Sistema de recompensa: Para dar agua al mono cuando este seleccione una respuesta correcta.

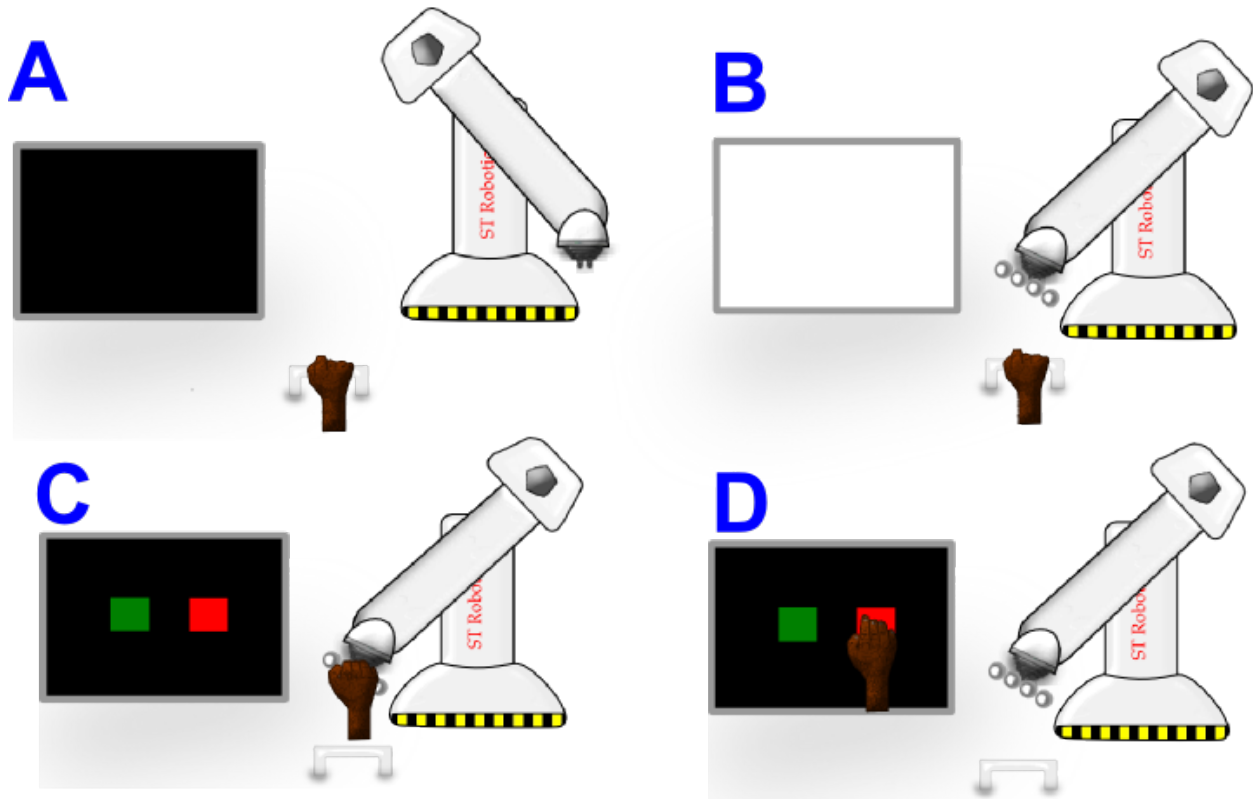


Figura 6. Esquema que ilustra las diferentes fases de la tarea. A: El mono coloca la mano sobre la agarradera para comenzar el ensayo. B: El brazo robótico coloca el objeto en posición y se muestra la pantalla blanca que indica que el mono puede iniciar a tocar el objeto. C: El mono toca el objeto. D: El mono contesta. Si la respuesta es correcta se recompensa con agua.

### 5.3.1. DESARROLLO DE UN SENSOR TÁCTIL CAPACITIVO

El sistema de entrenamiento conductual requiere de un sensor de tacto para detectar cuando el mono coloque su mano sobre los objetos. Para esto es necesario que el sensor sea lo suficientemente sensible y funcione rápidamente.

Un sensor capacitivo que utilice el principio de transferencia de carga cumple con estos requerimientos (Philipp, 1999). Es por ello que se diseñó un sensor basado en el circuito integrado AT42QT1010 de Atmel® (Atmel Corporation, San Jose, California, Estados Unidos). Este diseño permite utilizar el objeto como electrodo, lo cual evita la

necesidad de utilizar cualquier tipo de dispositivo adicional fuera del propio objeto y un cable (Philipp, 1999) (Atmel Corporation, 2010). El funcionamiento del sensor es simple: cuando se detecta la presencia de contacto sobre el objeto el circuito manda una señal eléctrica la cual es recibida por la computadora mediante una tarjeta de adquisición de datos.

Para una descripción más detallada del principio de operación y los diagramas de conexión del sensor, ver el apéndice A.

### 5.3.2. DESARROLLO DE UN SENSOR POR LUZ INFRARROJA

Se implementó una agarradera con el objetivo de dar control al mono del momento en que desee que se inicie un ensayo. Asimismo, esta agarradera servirá para entrenar al mono a mantener la mano fija durante la ejecución de la tarea, para que cuando el investigador haga registros electrofisiológicos, la actividad neuronal motora asociada al movimiento de la mano no introduzca artefactos en la actividad electrofisiológica del evento que se esté registrando.

Para poder detectar la presencia de la mano del mono sobre esta agarradera se diseñó un circuito eléctrico que consta de un LED de luz infrarroja y un fototransistor. Cuando el mono coloca su mano sobre la agarradera, el haz de luz infrarroja es interrumpido y el cambio de voltaje en el fototransistor indica a la computadora de control que el ensayo debe comenzar.

Para una descripción más detallada del circuito eléctrico ver el apéndice B.

### 5.3.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE RECOMPENSA

El sistema de recompensa consiste en una válvula electromecánica que se puede abrir y cerrar por medio de una señal digital, la cual es proporcionada por MATLAB® (The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, Estados Unidos) a través de una tarjeta de

adquisición de datos. Esto permite controlar el tiempo exacto que la válvula permanece abierta y de esta forma, controlar la cantidad de agua que es otorgada al mono como recompensa en cada ensayo.

El circuito eléctrico para implementar el sistema de recompensa se detalla en el apéndice C.

### 5.3.5. PROGRAMACIÓN DE UN BRAZO ROBÓTICO PARA LA MANIPULACIÓN DE LOS OBJETOS

Para poder presentar los objetos para su exploración utilizamos un brazo robótico ST Robotics R17 HPL<sup>®</sup> (Sands D, Cambridge, Inglaterra) con 5 grados de libertad (figura 7). La capacidad de carga del brazo robótico es de 8kg y su alcance máximo es de 750 mm en cualquier dirección. Además permite un control puntual de aceleración y velocidad y cuenta con una precisión de 0.1 mm. Esto nos permite presentar objetos en un amplio rango de posiciones y ángulos sin necesidad de intervención humana.

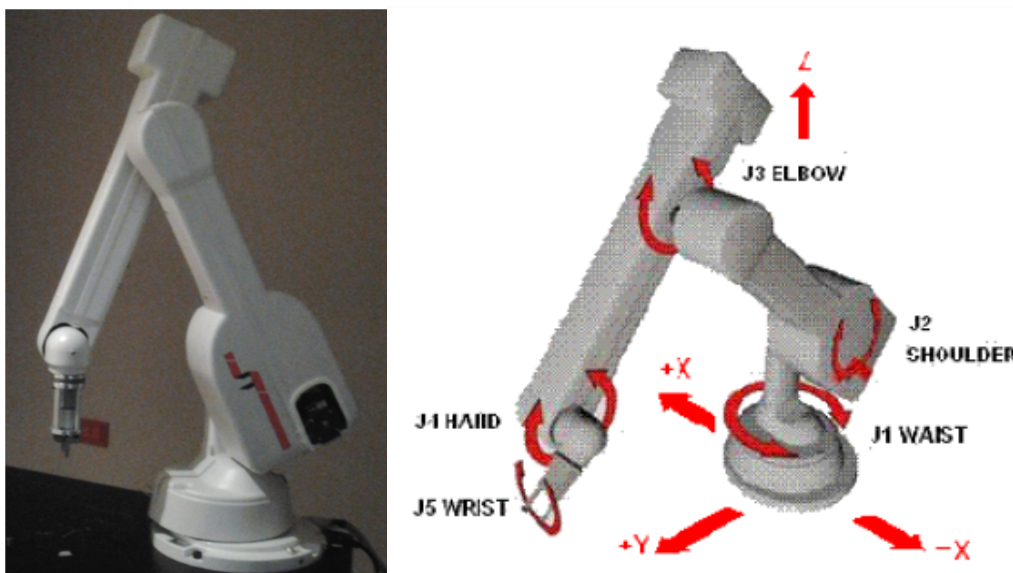


Figura 7. Brazo robótico ST Robotics R17 HPL<sup>®</sup>, sus ejes coordenados y sus articulaciones.



Para una descripción más detallada sobre la programación del brazo robótico consultar el apéndice C.

### 5.3.6. PROGRAMACIÓN DE LA TAREA E INTEGRACIÓN DEL SISTEMA

El sistema utiliza dos computadoras, la computadora A y la computadora B.

La computadora A utiliza el software Expo Psychophysics (Lennie P, New York University, Estados Unidos) para presentar los estímulos en pantalla y recibir las distintas señales de los sensores. Asimismo, la computadora B utiliza MATLAB® para seleccionar los objetos y ángulos aleatoriamente, controlar el brazo robótico y decodificar las coordenadas de la pantalla táctil; además de seleccionar el orden en que aparecerán las opciones en la pantalla.

Para que las dos computadoras pudieran comunicarse, se realizó un sistema de comunicación que utiliza tanto señales digitales, como señales analógicas; las cuales son transmitidas por 2 tarjetas de adquisición de datos. Para la computadora A se utilizó la tarjeta NI6251 de *National Instruments*® (National Instruments Corporation, Austin, Texas, Estados Unidos), y para la computadora B se utilizó una *Measurement Computing* USB-1208FS® (Measurement Computing Corporation, Norton, Massachusetts, Estados Unidos). Este arreglo nos permitió explotar las ventajas de ambos sistemas.

El esquema de la figura 8 muestra la integración de los componentes y la interacción entre los mismos.

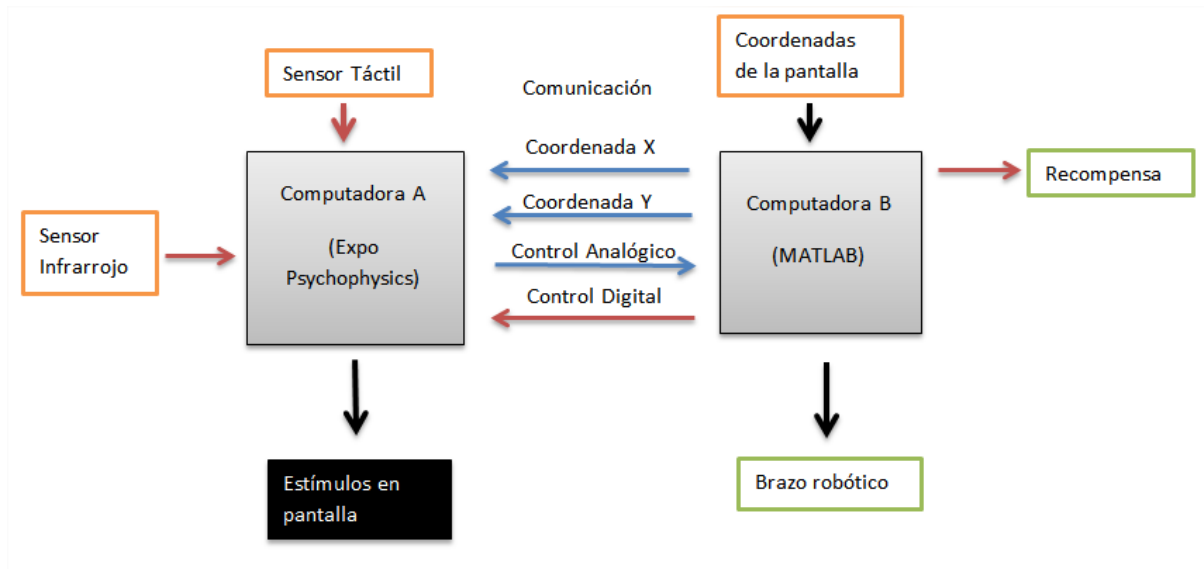


Figura 8. Componentes del sistema de entrenamiento conductual y su interacción. Flechas azules: señales analógicas; flechas rojas: señales digitales; recuadros anaranjados: sensores; recuadros verdes: efectores; recuadro negro: pantalla.

La computadora B codifica las coordenadas de la pantalla táctil, las convierte a niveles de voltaje y las envía a la computadora A por medio de señales analógicas. De esta forma Expo puede interpretarlas y saber cuál de las áreas mostradas fue tocada por el mono. Además se utilizó una señal de control analógico, que indica a MATLAB® en qué estado se encuentra el sistema. La señal de control digital sirve para indicar a la computadora A cuándo se han terminado de ejecutar algunas acciones (por ejemplo: mover el brazo robótico). De esta forma ambas computadoras se mantienen en sincronía.

### 5.3.7. PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA

El sistema fue programado utilizando diferentes estados, cada uno de los cuales corresponde a una fase de la tarea. El diagrama de flujo de la figura 9 muestra el programa de control en pseudo-código.

Durante el estado INICIO, la computadora A espera una señal indicando que el mono ha colocado su mano en la agarradera con el sensor por luz infrarroja; mientras tanto la computadora B está esperando una señal analógica de la computadora A.

Una vez que el mono ha sujetado la agarradera, el sensor envía una señal a A ( $\text{infra}=1$ ), ésta a su vez avisa a B con una señal analógica ( $\text{analogcntrl}=1$ ).

En este punto se pasa al estado SELECCIÓN DE OBJETO. MATLAB selecciona de forma pseudo-aleatoria uno de los objetos, además de determinar otros parámetros como el ángulo de presentación del objeto y las coordenadas donde aparecerán las áreas de respuesta. Cuando esta acción termina MATLAB envía una señal digital ( $\text{digitalcntrl}=1$ ).

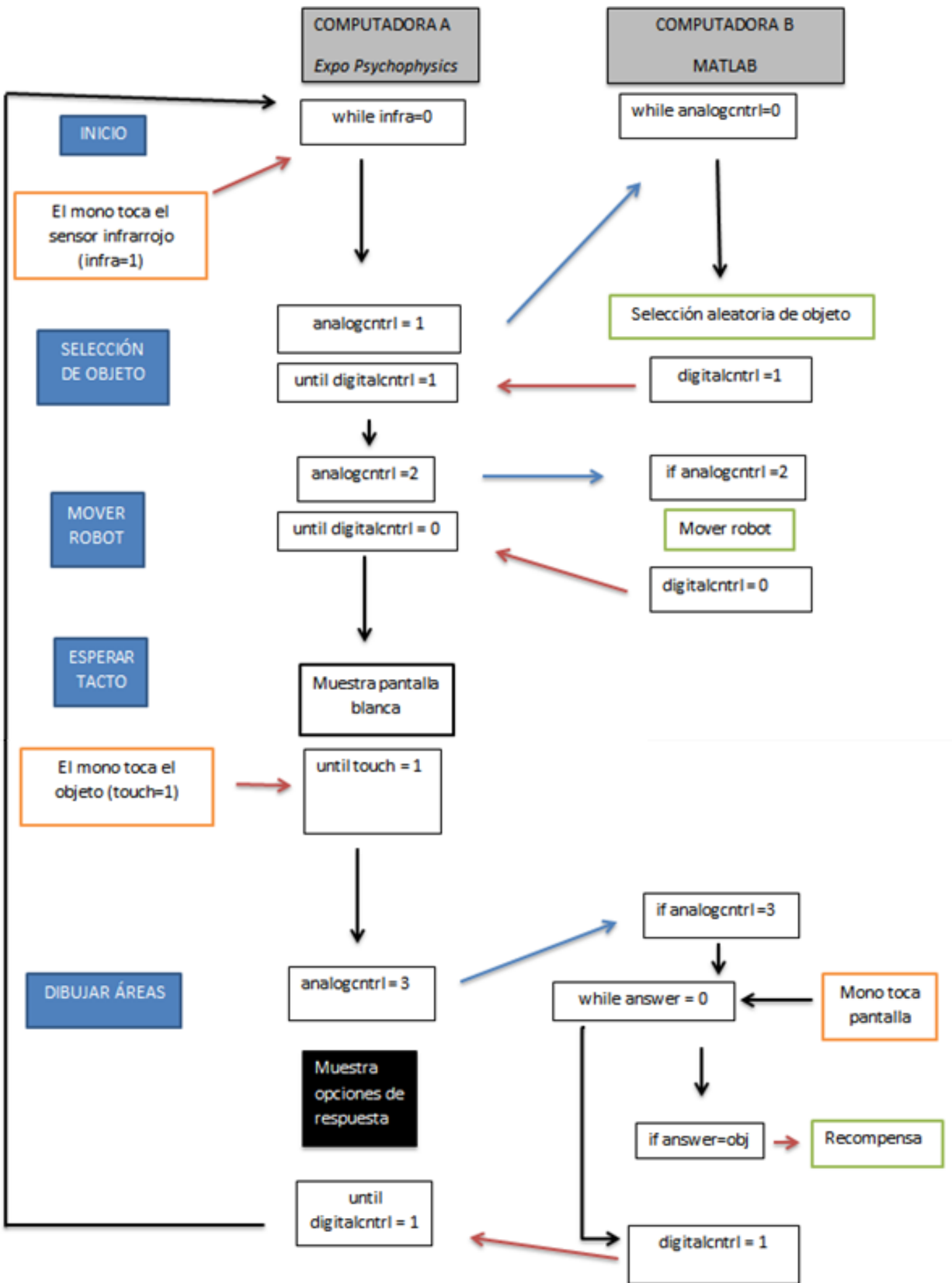


FIGURA 9. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA EN PSEUDO-CÓDIGO. EL CÓDIGO CORRESPONDIENTE A LA COMPUTADORA A FUE IMPLEMENTADO EN *EXPO PSCYCHOPHYSICS*, EL CÓDIGO DE LA COMPUTADORA B FUE IMPLEMENTADO EN MATLAB. LOS RECUADROS AZULES REPRESENTAN ESTADOS DEL SISTEMA; LOS RECUADROS BLANCOS, ACCIONES INTERNAS DEL PROGRAMA; RECUADROS ANARANJADOS, ENTRADAS, QUE CORRESPONDEN CON ACCIONES DEL SUJETO; RECUADROS VERDES, EFECTORES (BRAZO ROBÓTICO, RECOMPENSA); RECUADRO BLANCO RESALTADO O NEGRO, ESTÍMULOS EN PANTALLA. FLECHAS NEGRAS, CAMBIOS EN EL CONTROL INTERNO DEL PROGRAMA; FLECHAS AZULES, SEÑALES DE CONTROL ANALÓGICO; FLECHAS ROJAS, SEÑALES DE CONTROL DIGITAL.

Esta señal digital marca el paso al estado MOVER ROBOT. A no realiza ninguna acción, únicamente confirma que se encuentra en este estado con una señal analógica ( $analogcntrl = 2$ ). B recibe esta señal y procede a enviar un comando al brazo robótico para que este tome el objeto y lo muestre a los sujetos. Al terminar, envía una señal de control digital a A ( $digitalcntrl = 0$ ), que a su vez pasa al estado ESPERAR TACTO.

En este estado la computadora A muestra una pantalla blanca, este estímulo indica al sujeto que debe tocar el objeto. El sujeto lo hace y se detecta esta acción con el sensor capacitivo, que manda una señal digital a A ( $touch=1$ ).

Se pasa al estado DIBUJAR ÁREAS. A muestra las opciones de respuesta en la pantalla y pasa el control por medio de una señal analógica a B ( $analogcntrl=3$ ). B espera a que el mono toque la pantalla; una vez realizada esta acción se hace la comparación de la respuesta seleccionada con el objeto, si éstas coinciden, se administra recompensa. Posteriormente B avisa a A que ha terminado el estado por medio de una señal digital ( $digitalcntrl = 1$ ). Expo regresa al estado INICIO para el siguiente ensayo.

Este algoritmo puede ser implementado en cualquier lenguaje de programación, en este caso se escogió Expo Psychophysics y MATLAB por las razones expuestas anteriormente.

Para una descripción más detallada de cómo se implementó el algoritmo leer el apéndice D.

#### 5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para evaluar el desempeño del mono se utilizó la proporción de ensayos correctos respecto a ensayos totales menos los ensayos abortados durante una sesión diaria.

Para analizar la normalidad de los datos correspondientes a las latencias de respuesta, se utilizó una prueba Shapiro-Wilk (Shapiro y Wilk, 1965). Esta prueba es el mejor indicador de no-normalidad para un mayor rango de tamaños de muestra y presenta una mayor sensibilidad con respecto a otras pruebas de normalidad. (Shapiro, et al., 1968).

Para analizar las latencias de respuesta se utilizó una prueba no paramétrica Kruskal-Wallis. Para analizar las diferencias entre grupos se utilizaron las pruebas de comparaciones múltiples de Scheffe y Bonferroni.

Para determinar la significancia estadística del desempeño del mono, se utilizó una distribución binomial que establece el umbral por encima del cual se considera un desempeño diferente del obtenido por el azar.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. ENTRENAMIENTO CONDUCTUAL DE UN MONO RHESUS EN UNA TAREA DE DISCRIMINACIÓN DE OBJETOS

#### 6.1.1. ENTRENAMIENTO PROCEDURAL DE LA TAREA

Se decidió entrenar un mono Rhesus en la tarea descrita anteriormente para verificar la eficacia del sistema. Las características del mono se describen en la sección Sujeto Experimental. Las sesiones de entrenamiento se realizaron de lunes a sábado, a las 10:30 am.

Se entrenó al mono utilizando el principio de las aproximaciones sucesivas, es decir, se enseñó una parte de la tarea y se prosiguió a enseñar cada fase de la tarea de una forma gradual. De esta forma, el primer paso fue enseñarlo a asociar un estímulo en la pantalla con la administración de reforzador. Esto fue aprendido en un solo ensayo.

Una vez que el mono aprendió que tocando los estímulos en la pantalla recibía reforzador, se procedió a utilizar la agarradera de tal forma que, cuando esta fuera tocada apareciera el estímulo en pantalla.

El tercer paso consistió en presentar un objeto y esperar a que el mono levantara la mano de la agarradera y tocara el objeto, evento ante el cual se presentaban las opciones de respuesta en la pantalla. Todo el entrenamiento procedural de la tarea tomó 3 sesiones.

#### 6.1.2. ENTRENAMIENTO ASOCIATIVO DE LOS OBJETOS CON DISTINTOS COLORES

Una vez que el mono estuvo entrenado para realizar la secuencia de eventos básicos que requiere la tarea, se procedió a entrenarlo para asociar 2 objetos diferentes con 2



opciones en la pantalla. De esta manera, en un primer paso se entrenó al mono para asociar un objeto en forma de una línea con el color rojo, y un objeto en forma de 'T' con el color verde.

Para mostrar al mono la asociación entre objetos y colores, se utilizó el brazo robótico para colocar los objetos muy cercanos a las opciones de colores. Así, inicialmente se colocaron los objetos justo enfrente de la opción del color que le correspondía y gradualmente se varió la distancia entre los objetos hasta que ambos se encontraban a la mitad de la pantalla. De esta forma, el mono dependió cada vez menos de la posición del objeto y más de la forma de éstos. (Figura 10).

La distancia inicial entre los objetos fue de 30 cm, la cual corresponde a la distancia entre los dos extremos de la pantalla. Se redujo esta distancia en pasos de 7.5 cm (un cuarto de la distancia inicial). Una vez que el mono logró un alto desempeño cuando la distancia era de 7.5 cm, pero cercano al azar en la distancia de 0 cm, se prosiguió reduciendo la distancia en pasos de 1.88 cm (un cuarto de 7.5).

Se observó que el desempeño era dependiente del número de sesiones de entrenamiento utilizando una distancia dada y de la distancia entre los objetos. (Figura 11).

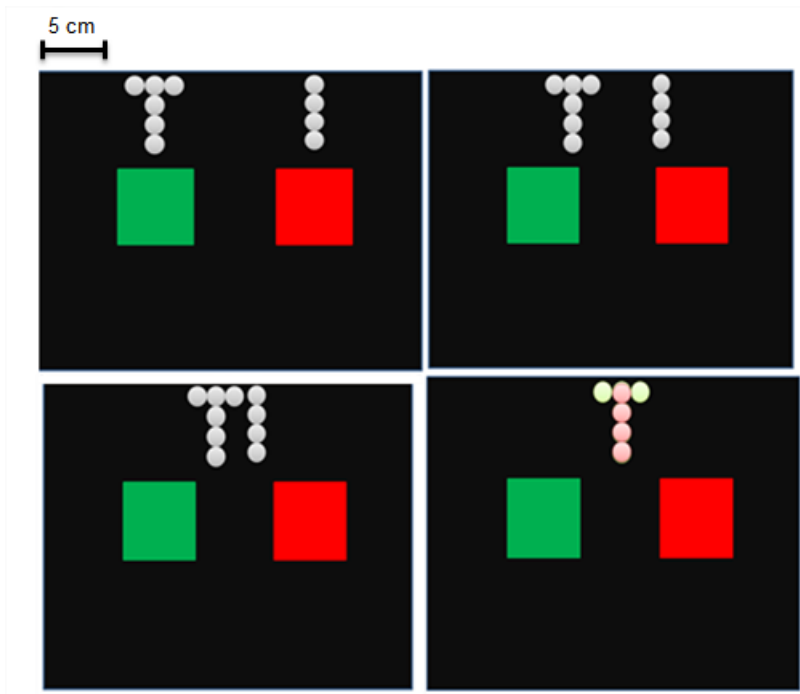


Figura 10. Reducción gradual de la distancia entre los dos objetos. La distancia inicial es de 30 cm, esta se redujo progresivamente hasta que los objetos se presentaban en el centro de la pantalla (0 cm.)

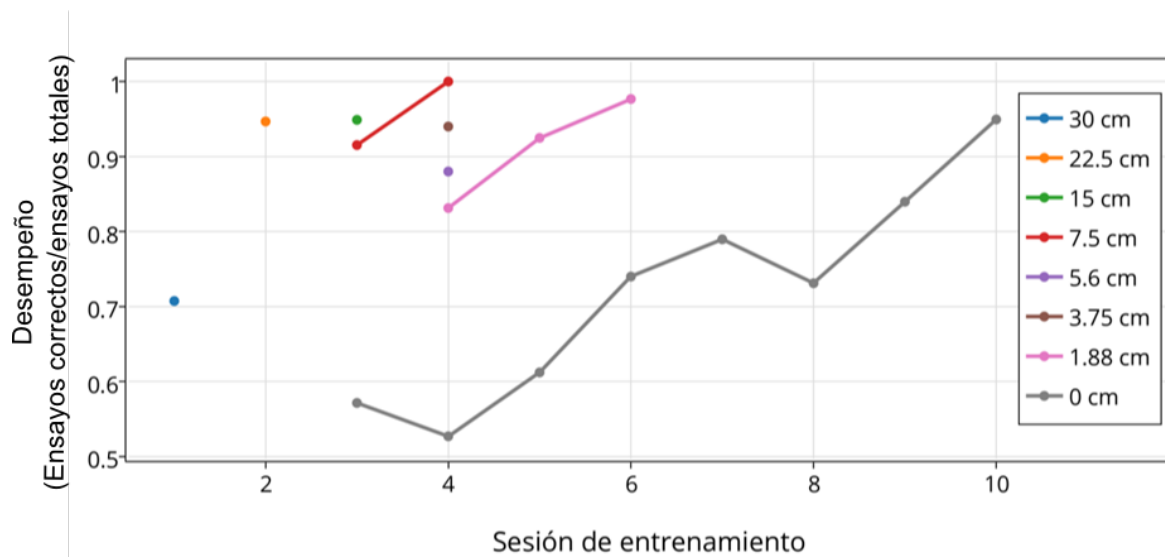


Figura 11. Desempeño del mono en función del número de sesiones para diferentes distancias entre los objetos.

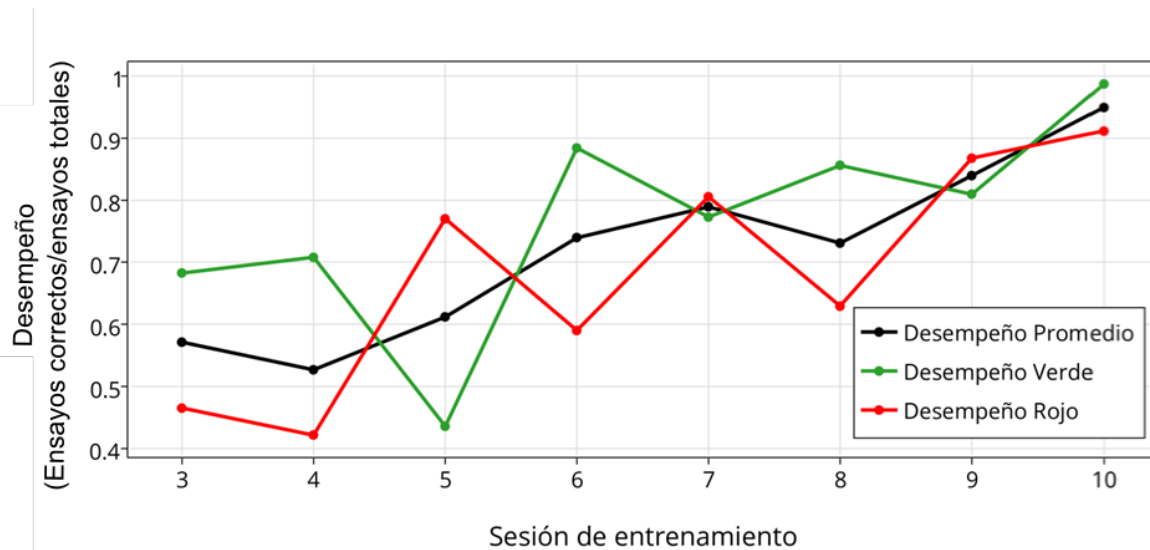


Figura 12. Desempeño del mono para la distancia de 0 cm y para ambos objetos.

Cuando se observó que el mono alcanzó un desempeño de cerca del 80% para la distancia de 0 cm, se continuó entrenándolo y se observó un aumento hasta alcanzar el 95 %. (Figura 12). En este punto se consideró que el mono había aprendido la asociaciones de los colores con los objetos.

Una vez alcanzado este desempeño, gradualmente se varió la posición de los objetos con respecto a las opciones de respuesta, hasta alcanzar una posición cercana a la agarradera. Asimismo, se movieron las posiciones de las opciones de respuesta en la pantalla táctil gradualmente hasta que quedaran de forma vertical. Esto se realizó con el propósito de que al acercarse el objeto a la agarradera el mono no interpretara este movimiento como la indicación de que la respuesta correcta era la opción roja. La figura 13 muestra la posición final de los objetos sobre la agarradera y de las áreas de respuesta.

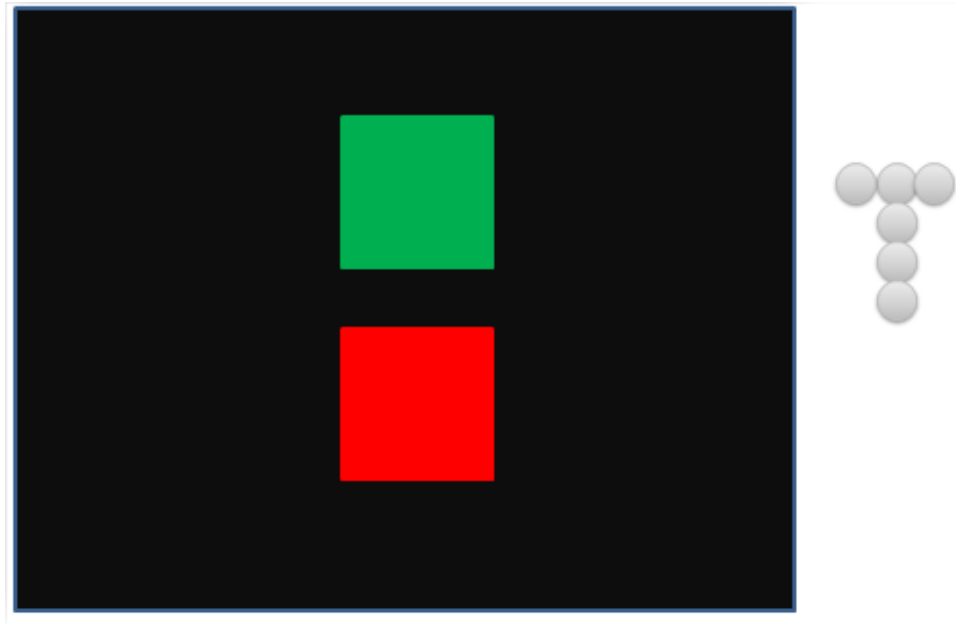


Figura 13. Posiciones finales de los objetos y de las áreas de respuesta

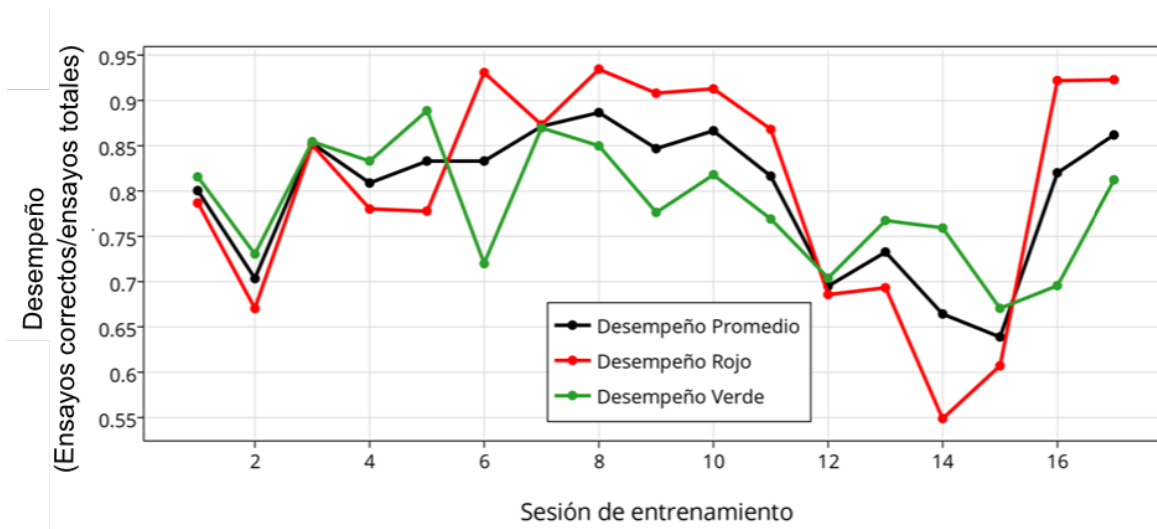


Figura 14. Desempeño del mono durante las sesiones de desplazamiento de los objetos. El decaimiento del desempeño en la sesión doce es probablemente explicado por variaciones normales en la motivación o atención del mono.

Se observó que el desempeño se mantuvo estable y, con la excepción de una reducción cerca del final del desplazamiento del objeto, el mono consiguió mantener un desempeño superior al 80% durante la mayoría de las sesiones (Figura 14). La

reducción observada en la sesión doce es probablemente explicada por variaciones normales en la motivación o atención del mono. Este tipo de variación es observada en diversos estudios conductuales en monos (Butler, 1953; Bachevalier y Mishkin, 1984; Harlow, 1950; Recanzone et al., 1993).

### 6.1.3. DISCRIMINACION DE MÁS DE DOS OBJETOS

Una vez que el sujeto pudo asociar dos objetos con sus correspondientes opciones de respuesta se agregó un tercer objeto asociado al color amarillo. Una vez que mostró un desempeño elevado, se agregó un cuarto objeto, asociado al color azul. (Figura 15).

Cuando se introdujo el objeto asociado al color amarillo, el desempeño general decayó a cerca del 50 por ciento, pero este regresó a un nivel superior al 70 por ciento en 9 sesiones. De manera similar, cuando se introdujo el objeto asociado al color azul, el desempeño cayó a cerca del 60 por ciento, recuperándose el desempeño superior al 70 por ciento en 5 sesiones. Esta recuperación y aprendizaje del nuevo objeto ocurre de una forma más o menos lineal. De esta manera, el mono logró asociar cuatro objetos diferentes con cuatro colores con un desempeño superior al 80% después de 18 sesiones de haber introducido el tercer objeto (figura 16).

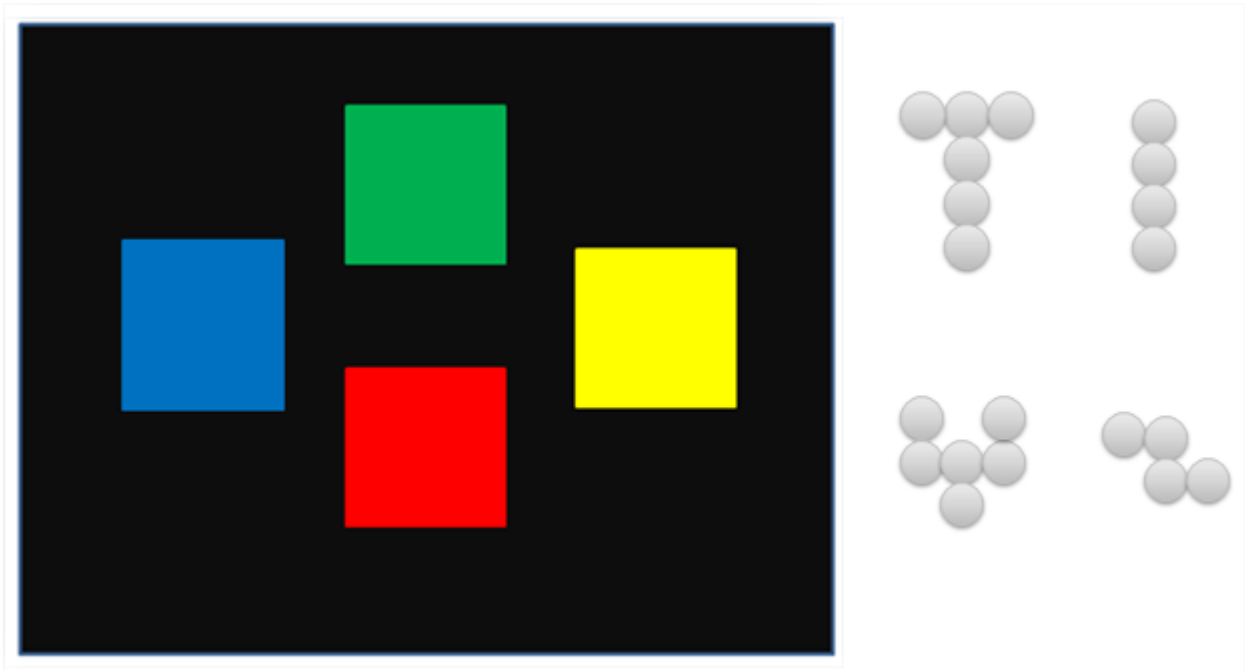


Figura 15. Los cuatro objetos distintos y los colores asociados.

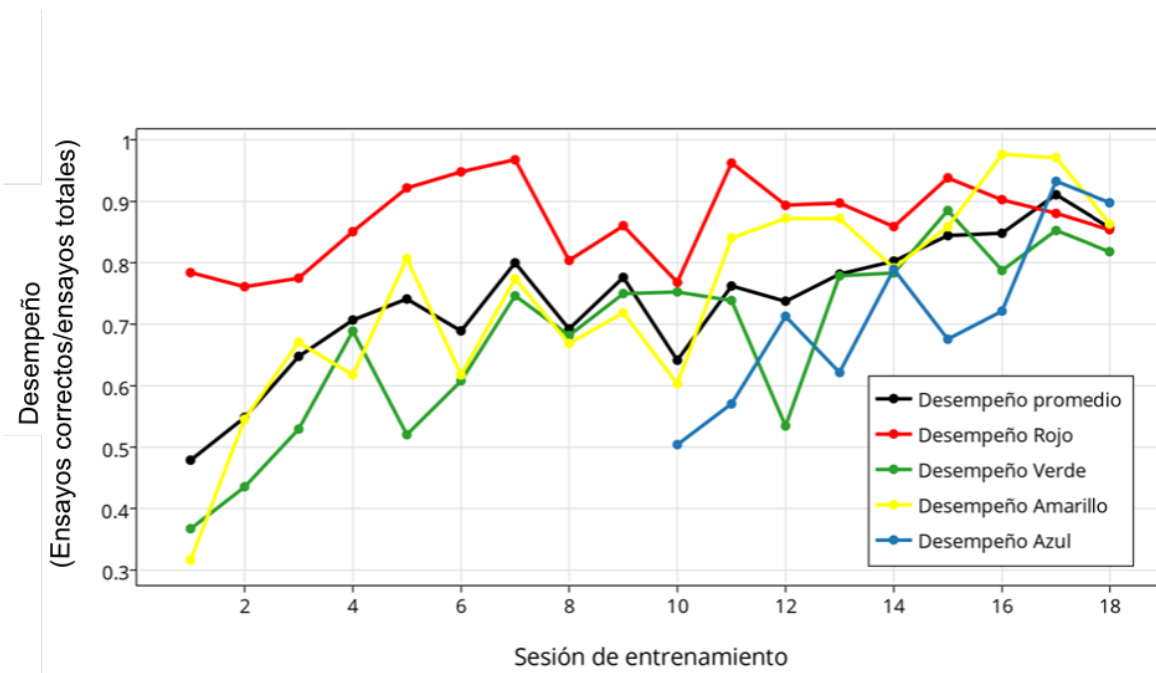


Figura 16. Desempeño del mono después de introducir un tercer y cuarto objetos. Se observa una reducción en el desempeño general el primer día de entrenamiento de cada objeto y un incremento aproximadamente lineal.

#### 6.1.4 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE RESPUESTA

Una vez que el mono alcanzó un desempeño alto para los cuatro objetos diferentes, se realizó un análisis de la latencia de respuesta para cada objeto.

Dado que los datos no se distribuyen de manera normal ( $p_{00}=5.0077e-06$ ,  $p_{01}=4.6350e-06$ ,  $p_{02}=2.2570e-06$ ,  $p_{03}=2.6351e-05$ ; Shapiro-Wilk,  $p<0.05$ ), se realizó una prueba no paramétrica Kruskal-Wallis.

Se encontró que existen diferencias significativas en los tiempos de respuesta para los distintos objetos. ( $p=1.4280e-95$ ; Kruskal-Wallis,  $p<0.05$ ). Estas diferencias fueron significativas al comparar entre el objeto asociado al color verde y el resto de los grupos, el objeto asociado al color azul y el resto de los grupos y los objetos asociados a los colores rojo y amarillo con el resto de los grupos, pero no entre sí. (Scheffe,  $p<0.05$ ; Bonferroni,  $p<0.05$ ) (Figura 17).

Al realizar las comparaciones de los tiempos de respuesta entre los ensayos correctos y los ensayos incorrectos se encontraron diferencias significativas entre los dos grupos. ( $p=1.147e-06$ ; Kruskal-Wallis,  $p<0.05$ ) (Figura 18). Estas diferencias se deben probablemente a la posición de las áreas de respuesta. En esta fase del entrenamiento cada uno de las opciones de respuesta se encuentra en una posición fija, e importantemente no son equidistantes con respecto a la posición del mono. Para el mono es más rápido contestar las opciones que están en la parte inferior de la pantalla. Para poder estandarizar los tiempos de respuesta entre los diferentes objetos, se decidió aleatorizar la posición de las áreas de respuesta.

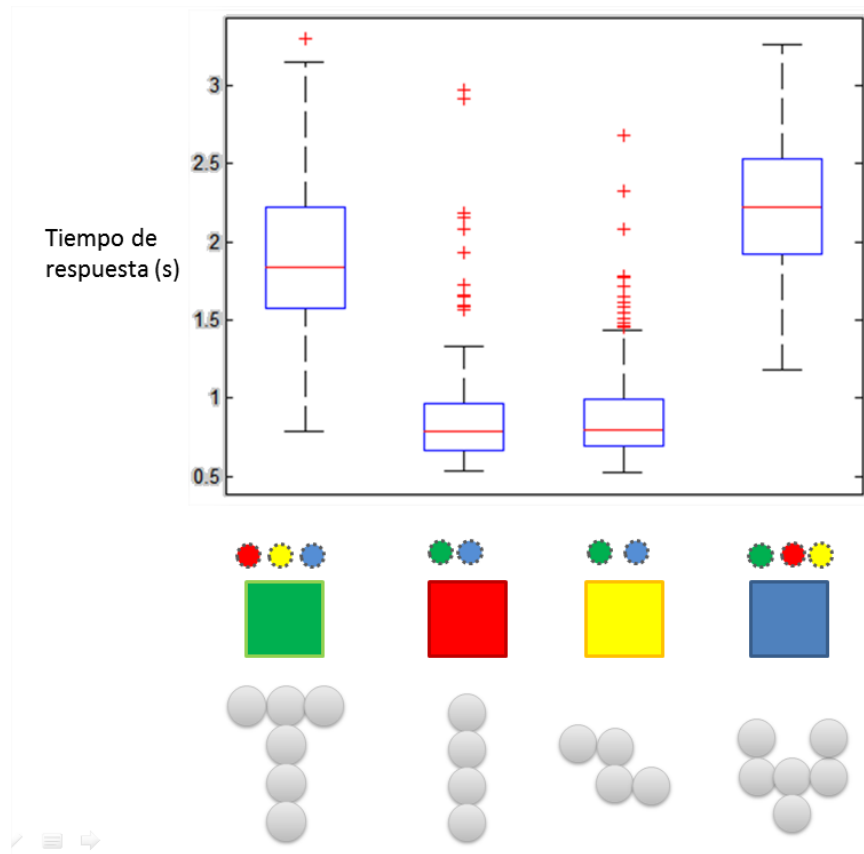


Figura 17. Comparación de los tiempos de respuesta para los diferentes objetos.

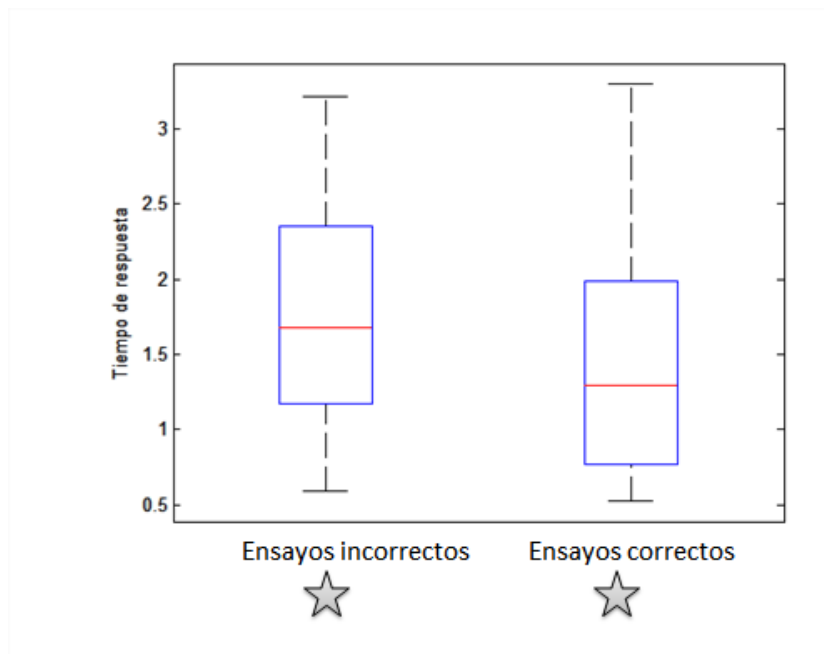


Figura 18. Comparación entre los tiempos de respuesta calculados para los ensayos correctos comparados con los ensayos incorrectos.



### 6.1.5 ALEATORIZACIÓN DE LA POSICIÓN DE LAS ÁREAS DE RESPUESTA

Una posibilidad es que la asociación de los 4 objetos diferentes se haya realizado con la posición del área de respuesta y no con el color de éstas. Es así que para descartar esta posibilidad se decidió aleatorizar la posición donde aparece cada una de las áreas de respuesta, escogiéndose ésta de manera aleatoria. Para ello se entrenó al mono para que seleccionara el color asociado a cada objeto, independientemente de su posición. Se consideró que el mono aprendió a asociar cada objeto con su color correspondiente cuando este realizó un desempeño superior al 80% para todos los objetos y posiciones de respuesta posibles a lo largo de 3 sesiones (1083 ensayos).

Se analizaron nuevamente los tiempos de respuesta y se encontró que hubo una diferencia significativa de los tiempos de respuesta del objeto asociado al color rojo con el resto de los grupos (Scheffe,  $p < 0.05$ ; Bonferroni,  $p < 0.05$ ) (figura 19). Si bien la aleatorización de la posición de respuesta eliminó las diferencias entre los objetos asociados a los colores verdes, amarillo y azul, el tiempo de respuesta para el objeto asociado al color rojo es significativamente menor. Esto puede ser atribuido a la baja complejidad de este objeto, siendo este una línea de 4 esferas. Pero, no es posible saberlo con certeza dado que no es posible cuantificar objetivamente la complejidad de un objeto.

De igual forma se analizó el tiempo de respuesta para los ensayos correctos en comparación con los ensayos incorrectos. Se encontró una diferencia significativa en los tiempos de respuesta para los ensayos correctos en comparación con los ensayos incorrectos ( $p = 6.752e-05$ ; Kruskal-Wallis,  $p < 0.05$ ). La diferencia en el tiempo de respuesta entre estos dos grupos es tal vez atribuida a la mayor incertidumbre que tiene el mono cuando está frente a una decisión difícil (ensayos incorrectos), que cuando la decisión es fácil (ensayos correctos) (Figura 20).

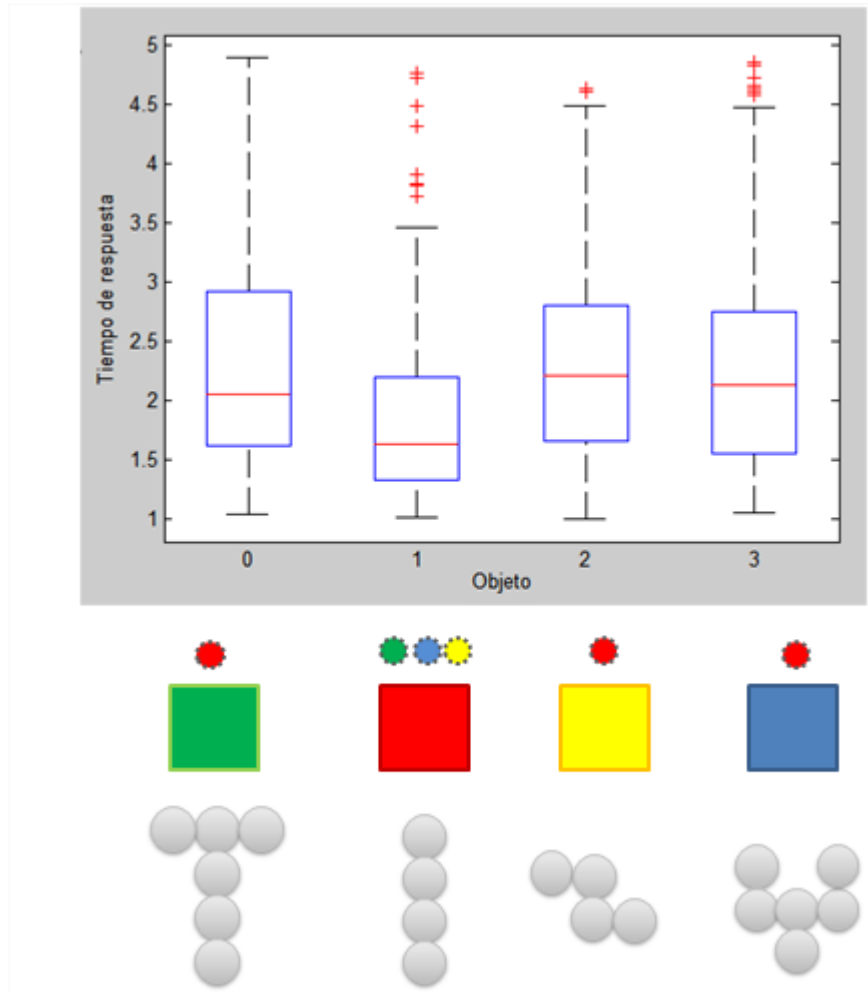


Figura 19. Comparación entre los tiempos de respuesta para cada objeto una vez aleatorizada la posición de las opciones en pantalla.

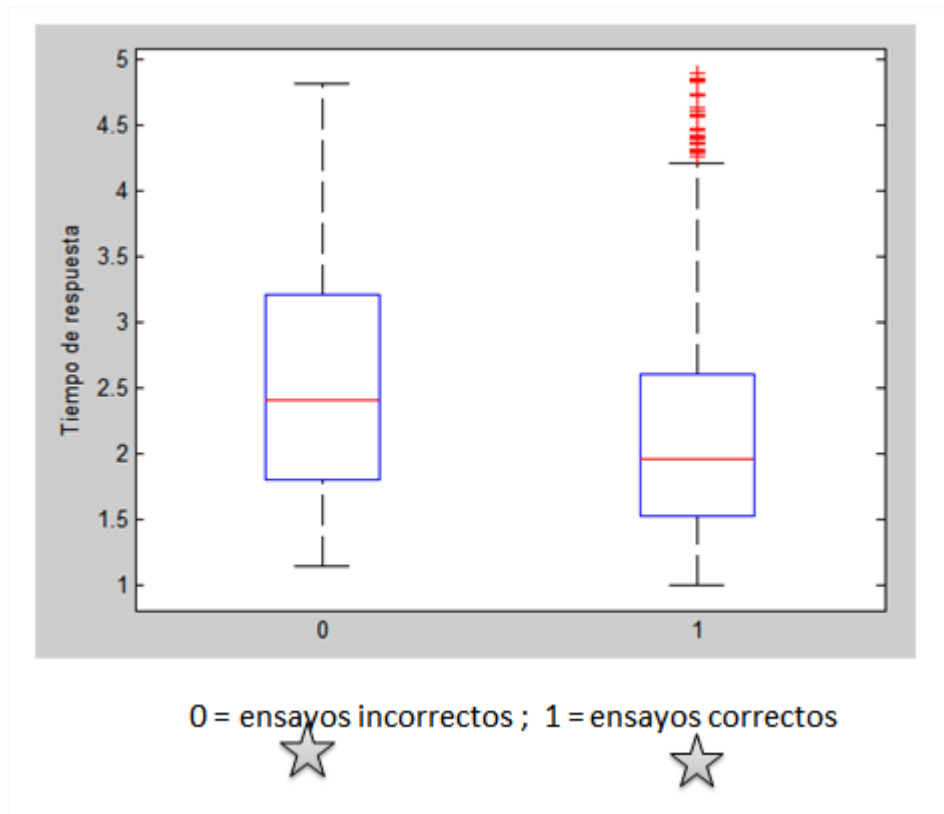


Figura 20. Comparación de los tiempos de respuesta entre ensayos correctos e incorrectos una vez aleatorizada la posición de las opciones de respuesta.

### 6.1.6 VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO CONDUCTUAL

Para analizar la eficacia del sistema de entrenamiento conductual desarrollado en el presente trabajo es necesario probar concluyentemente que el mono presenta un aprendizaje significativo en la tarea.

La figura 21 presenta una gráfica de desempeño de 1083 ensayos los cuales ocurrieron en tres sesiones diarias distintas, cada una de alrededor de 350 ensayos.

La gráfica de color negro, corresponde al desempeño total, las gráficas de colores representan el desempeño de los ensayos donde se presentó el objeto asociado a ese color.

Como se observa en la gráfica, el mono se desempeñó por arriba del 80% para todos los objetos. Se evaluó que el desempeño del mono no fuese aleatorio utilizando una distribución binomial. El nivel de azar dada una distribución binomial con probabilidad de éxito de 0.25 es de 33.33% ( $p < 0.001$ ), para una  $n$  de 270 (1083/4 dado que se presentan de forma aleatoria). Este resultado confirma que es altamente improbable que el mono conteste de forma aleatoria, lo cual demuestra que el sistema de entrenamiento conductual desarrollado es apropiado para entrenar un mono Rhesus en una tarea de discriminación de objetos.

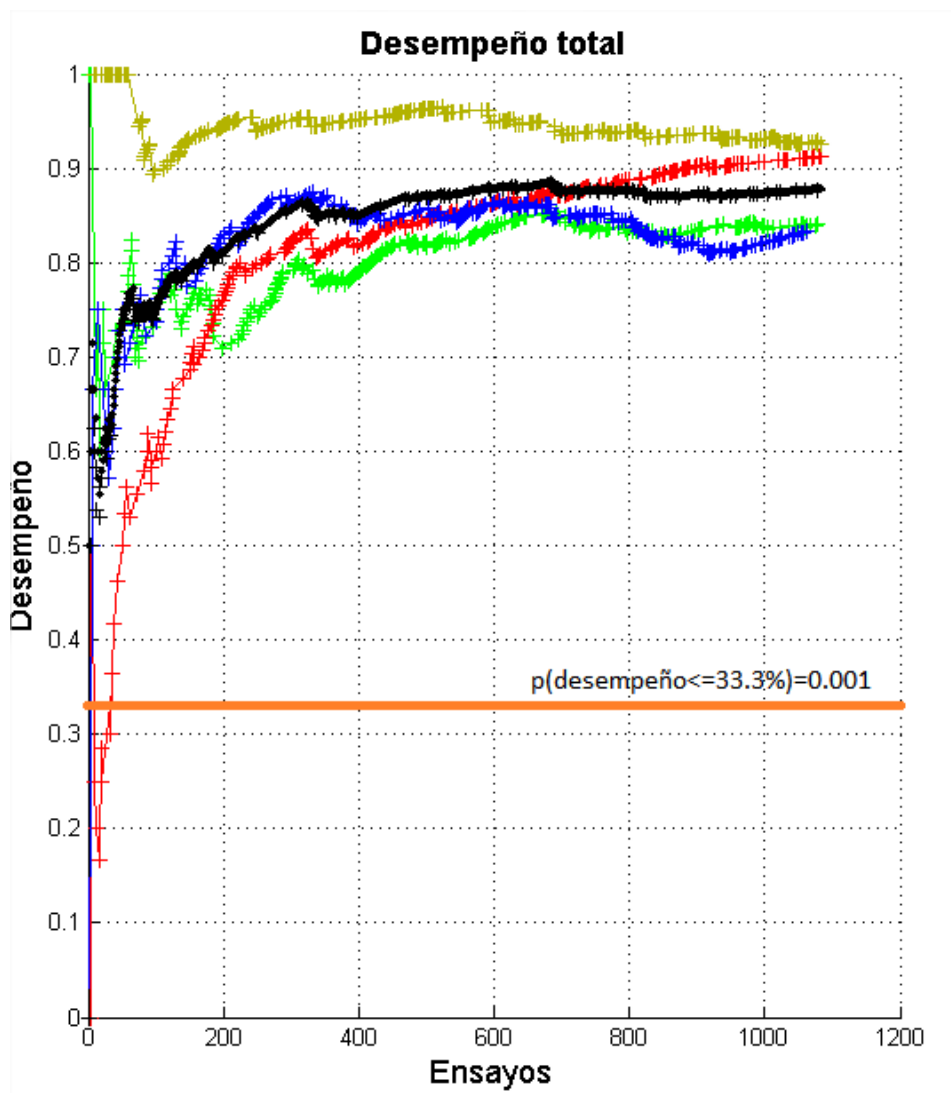


Figura 21. Desempeño del mono durante 1083 ensayos. El desempeño elevado es muestra de aprendizaje en la tarea.

## 7. DISCUSIÓN

El sistema de entrenamiento conductual presentado en este trabajo es el primero que permite entrenar monos Rhesus en tareas de discriminación de objetos tridimensionales, de forma automatizada.

La discriminación de objetos ha sido estudiada ampliamente en el sistema visual (Basile *et al.*, 2011; Buckley y Gaffan, 1997; Cowey y Gross, 1970; Guderian *et al.*, 2011). La abundancia del estudio de este sistema sensorial es debida a la facilidad de presentar los estímulos. Las tareas utilizadas en estos estudios hacen uso de una pantalla táctil donde se presentan los estímulos visuales, y el sujeto emite su respuesta tocando la pantalla. En contraste, la presentación de estímulos táctiles es más compleja ya que, entre otros factores, puede requerir de diferentes aparatos mecánicos diseñados específicamente para cada tarea. Por ejemplo: para la presentación de estímulos vibrotáctiles se han utilizado puntas metálicas montadas sobre un actuador mecánico que permite moverlas a diferentes frecuencias (Salinas *et al.*, 2000). También se han utilizado cilindros verticales que contienen ranuras las cuales se colocan en diferentes ángulos para que el sujeto experimental realice una tarea de discriminación de orientación (Fitzgerald *et al.*, 2006). No obstante ninguno de estos aparatos mecánicos es capaz de presentar objetos tridimensionales como estímulo, por lo que este fenómeno sensorial permanece poco estudiado.

La discriminación de objetos tridimensionales ha sido investigada utilizando estudios psicofísicos en humanos. Por ejemplo Lederman y Metzger (1985) determinaron la capacidad de los sujetos para reconocer objetos cotidianos rápidamente. También Berryman *et al.* (2006) construyeron un complicado sistema mecánico que imitaba objetos en forma de paralelepípedos con la capacidad de variar propiedades como el área de contacto, la longitud del objeto y la textura. A pesar de la complejidad del mecanismo, su uso en tareas de discriminación táctil de objetos complejos no es posible, ya que sólo puede simular paralelepípedos de diferentes texturas y tamaños, pero no objetos más elaborados como los utilizados en este trabajo. Importantemente

en este estudio se determinaron únicamente los umbrales de detección del tamaño de diferentes objetos y no la forma de los mismos. En otro estudio realizado por Overvliet *et al.* (2008) se determinó la capacidad de sujetos humanos para discriminar entre cilindros, cubos o barras. En este estudio varios objetos iguales y uno diferente eran colocados sobre una mesa y los sujetos humanos que fueron vendados de los ojos tenían que encontrar el objeto que era diferente. Determinaron el tiempo que tardaban los sujetos en encontrar los objetos con distintas estrategias de exploración. Sin embargo estos estudios psicofísicos no aportan información acerca de la actividad cerebral implicada en estas tareas sensoriales.

También se han realizado estudios de discriminación de objetos utilizando resonancia magnética funcional en donde los sujetos exploran objetos como paralelepípedos (Stoeckel *et al.*, 2004); paralelepípedos y esferas (Stoeckel *et al.*, 2003.) u objetos de formas complejas (James, 2002; Rojas, 2013). En cada uno de estos estudios la presentación de los objetos se realizó de forma manual y no hay necesidad de un sistema de entrenamiento dado que en humanos se puede utilizar simplemente la instrucción verbal de la tarea. Si bien estos estudios han arrojado datos importantes acerca de las áreas corticales implicadas en la discriminación háptica y visual de objetos tridimensionales, se necesitan datos electrofisiológicos para determinar cómo se realiza la codificación neural de este tipo de objetos. Para esto, el uso de primates no humanos es necesario ya que estos modelos experimentales permiten la manipulación quirúrgica e implantación de electrodos en las áreas corticales encontradas en los estudios por resonancia magnética. Para realizar dichos estudios es necesario un sistema de entrenamiento conductual que permita automatizar la presentación de objetos, como el presentado en este trabajo.

Uno de los primeros aparatos en ser utilizados en tareas conductuales para estudiar la discriminación visual de objetos es el Aparato General de Pruebas de Wisconsin (Harlow, 1949) (figura 22.) Para presentar los objetos el experimentador los colocaba sobre una bandeja que contenía dos huecos, uno de los cuales contenía la recompensa. Los objetos eran colocados de tal forma que cubrían el hueco por

completo. El sujeto tenía que asociar un objeto en particular con la recompensa e identificarlo correctamente. Para indicar su respuesta el sujeto levantaba el objeto y tomaba la recompensa que se encontraba debajo. Para cambiar los objetos entre ensayos se desplazaba hacia abajo una pantalla opaca que cubría la vista del mono, el experimentador cambiaba el conjunto de objetos y posteriormente se levantaba la pantalla para realizar el siguiente ensayo (figura 22).

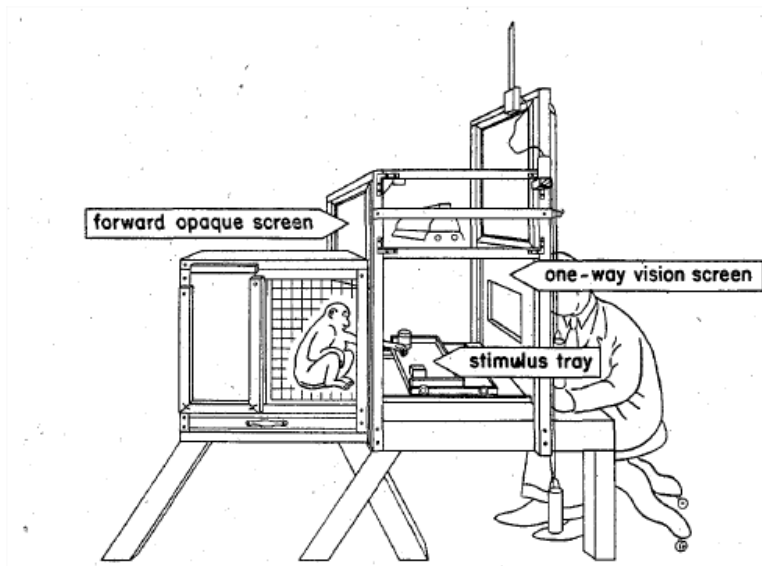


Figura 22. Aparato General de Pruebas de Wisconsin. Tomado de Harlow (1949).

Este aparato ha sido utilizado con éxito en el entrenamiento de monos e infantes humanos en tareas de discriminación visual de objetos (Overman *et al.*, 1992; Steere y Arnsten, 1997). No obstante, sólo es útil para tareas de discriminación de dos objetos, pero no es útil para una tarea como la utilizada en el presente trabajo donde el sujeto tiene que identificar un objeto en particular de un conjunto de objetos tridimensionales complejos y asociarlo a un color específico.

Una limitación importante del Aparato General de Pruebas de Wisconsin es que requiere de la presencia de un experimentador para cambiar los objetos cada ensayo. El aparato cuenta con una pantalla de visión de una vía con la cual el experimentador puede observar al sujeto, pero el sujeto no puede mirar al experimentador. Aun cuando esto suprime la presencia de pistas visuales no intencionales del investigador las cuales influyen el comportamiento del sujeto (Itakura y Tanaka, 1998; Kintz *et al.*, 1965),

existe la posibilidad de que el comportamiento sea influenciado mediante estímulos olfativos (Cann y Ross, 1989) o auditivos (Zampini y Spence, 2004) no intencionales por parte del experimentador. En el estudio de Cann y Ross demuestran que distintos aromas influyen en la percepción que tenían los sujetos de las imágenes mostradas y en el estudio de Zampini y Spence se demuestra que distintos sonidos resultan en una percepción alterada de las cualidades de los objetos. Por consiguiente, un sistema como el presentado en este trabajo que permite automatizar la tarea y minimizar la interacción del experimentador con el sujeto es altamente favorable respecto a los sistemas manuales. Además, la automatización resulta en una reducción no sólo del esfuerzo físico o el tedio que la presentación manual de los objetos implica para el experimentador, sino también de la variabilidad inter-ensayo dado que el brazo robótico es capaz de realizar movimientos más precisos tanto espacial como temporalmente. Por ejemplo en un estudio realizado por Messier y Kalaska (1999) estudiaron la variabilidad que tenían los sujetos humanos en la velocidad, aceleración y posición final de la mano durante la ejecución de un movimiento de alcance. Comenzando desde un punto fijo, se les instruyó que movieran su mano hacia diferentes objetivos encontrados en diferentes posiciones finales. Determinaron que para un objetivo determinado, la diferencia en la posición final podía ser de hasta 8 cm en cualquier dirección. En comparación, el brazo robótico utilizado en el sistema desarrollado para este trabajo tiene una resolución espacial de 0.1 mm, por lo que la variabilidad en la posición final de un movimiento es mínima.

El sistema presentado en este proyecto fue desarrollado de tal forma que es adaptable para realizar otras tareas de discriminación. Por ejemplo, alumnos del laboratorio de sistemas sensoriales y planeación motora (B-05) del Instituto de Neurobiología implementaron una tarea de discriminación de la orientación utilizando este sistema. En dicha tarea, un mono Rhesus tiene que discriminar la dirección de giro de un objeto elipsoide utilizando únicamente el sentido del tacto. Para lograr esto colocaron una placa de acrílico para bloquear la visión del mono. En un principio la placa era traslúcida y se fue opacando progresivamente hasta que el mono logró realizar la tarea sin información visual. Aunque la tarea de discriminación de objetos utilizada en este



trabajo es más compleja, sería posible realizar el mismo proceso de tal forma que los sujetos la realicen utilizando solamente el sistema somatosensorial.

Como se puede observar en la gráfica de la figura 21 así como en las curvas de aprendizaje mostradas anteriormente (figuras 14 y 16) el mono demostró un aprendizaje significativo. Es difícil realizar la comparación de la eficacia de sistemas de entrenamiento que utilizan procedimientos muy diferentes y cuyas tareas conductuales varían en su diseño y complejidad, por lo que una comparación cuantitativa no es aplicable. No obstante, curvas de aprendizaje aproximadamente lineales como las encontradas en este trabajo se han reportado en la literatura (Harlow 1949; Overman *et al.*, 1992; Recanzone *et al.*, 1993; Butler, 1953; Bachevalier y Mishkin, 1984). Harlow (1949) reporta que una vez que el mono aprende el primer conjunto de estímulos, el aprendizaje de nuevos conjuntos es más rápido. Esto concuerda con los datos presentados en este trabajo donde el aprendizaje de los dos primeros estímulos (objetos asociados a los colores rojo y verde) es lento y es más rápido en los estímulos aprendidos posteriormente, siendo la pendiente de la curva del último estímulo aprendido (azul) la más pronunciada. Sin embargo, una vez que el animal se ha especializado altamente en la tarea la curva de aprendizaje es muy rápida y no tarda en acercarse a la asíntota correspondiente al 100 por ciento de desempeño, asemejándose más a una curva exponencial o hiperbólica (Mazur y Hastie, 1978). Este fenómeno ocurre también en las curvas de aprendizaje mostradas por Overman *et al.* (1992), donde en una tarea de discriminación de objetos, la curva de aprendizaje para infantes humanos de entre 12 y 24 meses es lenta y aproximadamente lineal, mientras que las de los adultos es exponencial. Entonces, la forma de la curva de aprendizaje depende de varios factores como la complejidad de la tarea, la cantidad de entrenamiento de los sujetos o la edad de los mismos. En general, entre más rápido sea el aprendizaje la curva se asemeja a una exponencial y entre más lento a una línea recta.

El sistema de entrenamiento conductual desarrollado en el presente trabajo permite implementar una tarea de identificación y asociación de objetos tridimensionales, nunca

antes utilizada en la investigación científica. Además, permite implementar otras tareas de discriminación y automatizar el proceso de entrenamiento de los animales. Por estas razones el presente trabajo representa una contribución importante a las neurociencias.

## 8. CONCLUSIONES

Se desarrolló con éxito un sistema de entrenamiento conductual que permite entrenar primates no humanos en una tarea de discriminación de objetos. El sistema es completamente automatizado y fácilmente adaptable para implementar otras tareas de discriminación.

Se analizó la eficacia del sistema por medio del entrenamiento de un mono Rhesus en la tarea de discriminación de objetos utilizando dos modalidades sensoriales, la vista y el tacto. El mono demostró un aprendizaje significativo a lo largo de las sesiones de entrenamiento y alcanzó un desempeño superior al 80% discriminando hasta 4 objetos diferentes.

Este sistema representa un avance importante en el estudio de los sistemas sensoriales y motores, ya que en el futuro permitirá elucidar los mecanismos neuronales de la discriminación de objetos tridimensionales por medio del tacto.

## REFERENCIAS

Atmel Corporation. (2010). *One Channel Touch Sensor IC AT42QT1010*. [Hoja de datos]. Disponible en: [www.adafruit.com/datasheets/AT42QT1010.pdf](http://www.adafruit.com/datasheets/AT42QT1010.pdf)

Bachevalier, J., & Mishkin, M. (1984). An early and a late developing system for learning and retention in infant monkeys. *Behavioral neuroscience*, 98(5), 770.

Basile BM, Hampton RR (2011) Monkeys recall and reproduce simple shapes from memory. *Curr Biol* 21:774–778.

Bensmaia, S. J., Denchev, P. V, Dammann, J. F., Craig, J. C. & Hsiao, S. S. (2008). The representation of stimulus orientation in the early stages of somatosensory processing. *The Journal of Neuroscience*, 28(3):776–786.

Berryman LJ, Yau JM, Hsiao SS. (2006) Representation of Object Size in the Somatosensory System. *J Neurophysiol* 96: 27–39.

Buckley M.J., Gaffan D. (1997). Impairment of Visual Object-Discrimination Learning After Perirhinal Cortex Ablation. *Behavioral Neuroscience*, Vol. III, No. 3, 467-475.

Butler, R. A. (1953). Discrimination learning by rhesus monkeys to visual-exploration motivation. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 46(2), 95.

Cann A, Ross DA. (1989). Olfactory Stimuli as Context Cues in Human Memory. *The American Journal of Psychology*, Vol. 102, No. 1, pp. 91-102.

Cowey A, Gross CG. (1970). Effects of Foveal Prestriate and Inferotemporal Lesions on Visual Discrimination by Rhesus Monkeys. *Exp. Brain Res.* 11, 128—144.

- DiCarlo JJ, Johnson KO. (2000) Spatial and temporal structure of receptive fields in primate somatosensory area 3b: effects of stimulus scanning direction and orientation. *J Neurosci*, 20:495/510.
- Fitzgerald, P. J., Lane, J. W., Thakur, P. H., & Hsiao, S. S. (2004). Receptive Field Properties of the Macaque Second Somatosensory Cortex: Evidence for Multiple Functional Representations. *J. Neurosci.*, 24(49):11193–11204
- Fitzgerald, P. J., Lane, J. W., Thakur, P. H., & Hsiao, S. S. (2006). Receptive Field Properties of the Macaque Second Somatosensory Cortex: Representation of Orientation on Different Finger Pads. *J Neurosci*, 26(24): 6473–6484.
- Gardner EP, Debowy DJ, Ro JY, Ghosh S. (2002) Sensory monitoring of prehension in the parietal lobe: a study using digital video. *Behav Brain Res*; 135(1-2): 213–224.
- Guderian S, Brigham D, Mortimer M. (2011). Two processes support visual recognition memory in rhesus monkeys. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. vol. 108 no. 48, 19425-19430
- Harlow H. F. (1949). The formation of learning sets. *Psychological Review*. 56(1), 51-65.
- Harlow H. F. (1950). Learning and satiation of response in intrinsically motivated complex puzzle performance by monkeys. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 43(4), 289.
- Hsiao S. (2008) Central mechanisms of tactile shape perception. *Current Opinion in Neurobiology*, 18:418–424.
- Hubel DH, Wiesel TN (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *J Physiol (Lond)* 160:106–154.

- Itakura S, Tanaka M. (1998). Use of Experimenter-Given Cues During Object-Choice Tasks by Chimpanzees (*Pan troglodytes*), an Orangutan (*Pongo pygmaeus*), and Human Infants (*Homo sapiens*). *Journal of Comparative Psychology*. Vol. 112, No. 2, 119-126
- James TW, Humphrey GH, Gati JS, Servos P, Menon RS, Goodale MA. Haptic study of three-dimensional objects activates extrastriate visual areas. *Neuropsychologia* 40 (2002) 1706–1714.
- Johnson KO. (2001) The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors. *Curr Opin Neurobiol*, 11:455-461.
- Kintz BL, Delprato DJ, Mettee, DR, Persons, CE, Schappe, RH. (1965). The experimenter effect. *Psychological Bulletin*. Vol. 63, No. 4, 223-232
- Lederman S, Metzger V. (1985). Identifying objects by touch: An "expert system". *Perception & Psychophysics* 37 (4). 299-302.
- Mazur, J. E., & Hastie, R. (1978). Learning as accumulation: a reexamination of the learning curve. *Psychological Bulletin*, 85(6), 1256.
- Messier, J., & Kalaska, J. F. (1999). Comparison of variability of initial kinematics and endpoints of reaching movements. *Experimental Brain Research*, 125(2), 139-152.
- Overman W, Bachevalier J, Turner M, Peuster A. (1992). Object Recognition Versus Object Discrimination: Comparison Between Human Infants and Infant Monkeys. *Behavioral Neuroscience*. Vol. 106, No. 1, 15-29.
- Overvliet KE, Smeets JBJ, Brenner E. (2008). The use of proprioception and tactile information in haptic search. *Acta Psychologica* 129 (2008) 83–90.
- Philipp H. (1999). Charge Transfer Sensing. *Sensor Review*, 19(2):96-105.

- Recanzone, G. A., Schreiner, C. E., & Merzenich, M. M. (1993). Plasticity in the frequency representation of primary auditory cortex following discrimination training in adult owl monkeys. *The Journal of Neuroscience*, 13(1), 87-103.
- Rojas E. (2013). Regiones corticales involucradas en el reconocimiento de objetos por medio del tacto. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Neurobiología). Instituto de Neurobiología, Universidad Nacional Autónoma de México. Fecha de presentación de examen: Octubre, 2013.
- Romo R, Hernandez A, Zainos A, Salinas E. (1998). Somatosensory discrimination based on cortical microstimulation. *Nature* 392:387–90.
- Salinas E, Hernández A, Zainos, Romo R. (2000). Periodicity and Firing Rate As Candidate Neural Codes for the Frequency of Vibrotactile Stimuli. *The Journal of Neuroscience*. 20(14):5503–5515.
- Stoeckel MC, Weder B, Finkofsky F, Seitz RJ. (2003) A fronto-parietal circuit for tactile object discrimination: an event-related fMRI study (2003). *NeuroImage* 19 (2003) 1103–1114.
- Stoeckel MC, Weder B, Finkofsky F, Seitz RJ. (2004) Left and right superior parietal lobe in tactile object discrimination. *European Journal of Neuroscience*. 19:1067-1072.
- Shapiro SS, Wilk MB. (1965). An analysis of variance tests for normality. *Biometrika* 52:591.
- Shapiro SS, Wilk MB, Chen H. (1968) A comparative study of various tests for normality. *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 63, No. 324, pp. 1343-137

Steere JC, Arnsten AFT. (1997). The  $\alpha$ -2A Noradrenergic Receptor Agonist Guanfacine Improves Visual Object Discrimination Reversal Performance in Aged Rhesus Monkeys. *Behavioral Neuroscience*. Vol. III, No. 5, 883-891.

Zampini M, Spence C. (2004). The role of auditory cues in modulating the perceived crispness and staleness of potato chips. *Journal of Sensory Studies*, 19:347-363.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación de un objeto tridimensional. ....	13
Figura 2. Representación de la mano y los dígitos en SII de un mono Rhesus.....	14
Figura 3. Actividad eléctrica de una neurona registrada en SII.....	15
Figura 4. Tasa de disparo de una neurona registrada en el área 7. ....	16
Figura 5. Objetos utilizados durante el entrenamiento. ....	20
Figura 6. Esquema que ilustra las diferentes fases de la tarea.....	22
Figura 7. Brazo robótico, sus ejes coordenados y articulaciones. ....	24
Figura 8. Componentes del sistema y su interacción.....	26
Figura 9. Diagrama de flujo del programa en pseudo-código. ....	29
Figura 10. Reducción gradual de la distancia entre los objetos. ....	34
Figura 11. Desempeño del mono en función del número de sesiones para diferentes distancias entre los objetos.....	34
Figura 12. Desempeño del mono para la distancia de 0 cm para ambos objetos. ....	35
Figura 13. Posiciones finales de los objetos y de las áreas de respuesta .....	36
Figura 14. Desempeño del mono durante las sesiones de desplazamiento de los objetos. ....	36
Figura 15. Los cuatro objetos distintos y los colores asociados.....	38
Figura 16. Desempeño del mono después de introducir un tercer y cuarto objetos .....	38
Figura 17. Comparación de los tiempos de respuesta para los diferentes objetos.....	40
Figura 18. Comparación entre los tiempos de respuesta para los ensayos correctos e incorrectos .....	40
Figura 19. Comparación entre los tiempos de respuesta para cada objeto una vez aleatorizada la posición de las opciones en pantalla .....	42
Figura 20. Comparación de los tiempos de respuesta entre ensayos correctos e incorrectos una vez aleatorizada la posición de las áreas de respuesta..	43
Figura 21. Desempeño del mono durante 1083 ensayos.....	44
Figura 22. Aparato General de Pruebas de Wisconsin .....	46
Figura A1. Diseño básico de un sensor capacitivo de transferencia de carga.....	61

Figura A2. Diagrama de conexión del circuito integrado Atmel AT42QT1010 .....	62
Figura B1. Diagrama de conexión del circuito para el sensor infrarrojo.....	63
Figura C1. Diagrama de conexión del circuito para el sistema de recompensa .....	65
Figura D1. Ventana <i>Places</i> de <i>Robowin</i> .....	67
Figura D2. Definición de una palabra en FORTH.....	68
Figura D3. Función en MATLAB para enviar comandos al brazo robótico .....	69
Figura D4. Definición de parámetros de comunicación serial en MATLAB.....	69

## LISTA DE TABLAS

Tabla D1. Resumen de comandos en FORTH.....	66
Tabla E1. Rutinas de Expo Psychophysics utilizadas .....	70

## APÉNDICES

### APÉNDICE A. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR TÁCTIL CAPACITIVO

Uno de los diseños más simples para un sensor de tacto es hacer pasar una ligera corriente eléctrica por el objeto metálico y medir la resistencia eléctrica en presencia y ausencia de una mano. Dado que la resistencia de la mano es mucho mayor que la del objeto, podemos detectar fácilmente cuando este está siendo tocado. Sin embargo, este principio tiene el inconveniente que entre mayor sensibilidad se requiera, mayor es la corriente que se necesita pasar a través del objeto metálico, y por ende, de la mano que lo toque. Para aplicaciones sencillas, esto es suficiente. Pero, para un sistema de entrenamiento conductual que posibilitará la realización de registros electrofisiológicos de las neuronas de un mono durante la realización de una tarea de discriminación de objetos, no es permisible utilizar una corriente eléctrica, ya que esta afectaría las mediciones electrofisiológicas.

Entonces, es una mejor opción el uso de un sensor de tacto que mida la capacitancia de la mano. Pero, dado que la capacitancia del cuerpo humano en condiciones normales es de tan solo algunas decenas de picofarads. ( $1 \times 10^{-12}$  F), se requiere de un sensor muy sensible para poder detectarla. La solución más óptima para este problema es utilizar un sensor basado en el principio de transferencia de carga, que permite detectar diferencias en capacitancia tan sutiles como de algunos cuantos femptofarads ( $1 \times 10^{-15}$  F). (Philipp, 1999)

El principio de transferencia de carga funciona cargado un electrodo, en este caso el objeto metálico, a un potencial fijo y posteriormente transferir esa carga a un detector de carga, a través del cual es posible calcular la capacitancia del electrodo. (Philipp, 1999)

De esta forma, cuando la mano está presente sobre el objeto, la capacitancia cambia muy poco, pero esa diferencia es suficiente para detectar la presencia de la mano.

Para realizar la operación de transferencia se utilizan interruptores. Es posible realizar un circuito básico utilizando simples switches electromecánicos; sin embargo, la velocidad de apertura de un interruptor electromecánico es lenta (aproximadamente 15 ms) comparada con un interruptor de estado sólido como un transistor MOSFET cuyo tiempo para cambiar de estado está en el orden de unos cuantos nanosegundos. (Philipp, 1999)

La figura A1 muestra un circuito básico de un sensor capacitivo por transferencia de carga. S1 y S2 son los interruptores,  $C_x$  es la capacitancia del electrodo y  $R_x$  es la resistencia propia del objeto.

Con este circuito, es muy simple calcular la capacitancia  $C_x$  bajo ambas condiciones; presencia o ausencia de la mano. Basta con aplicar la fórmula de capacitancia:

$$C_X = C_S \cdot \frac{V_S}{V_R}$$

Para implementar este diseño se eligió un circuito integrado AtmelAT42QT1010. La figura A2, muestra el diagrama de conexión para el circuito integrado.

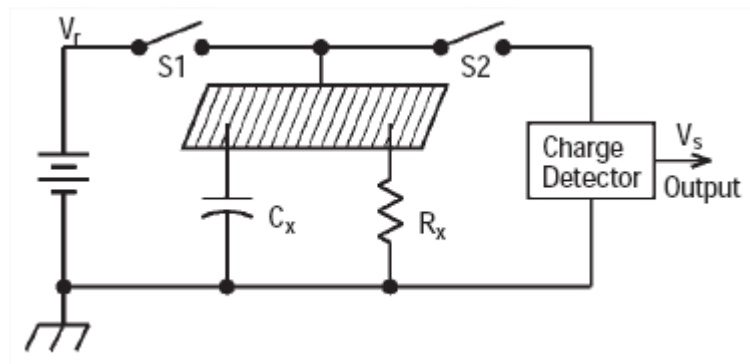


Figura A1. Diseño básico de un sensor capacitivo de transferencia de carga. S1 y S2: interruptores,  $C_x$ : Capacitancia del objeto,  $R_x$ : Resistencia del objeto.

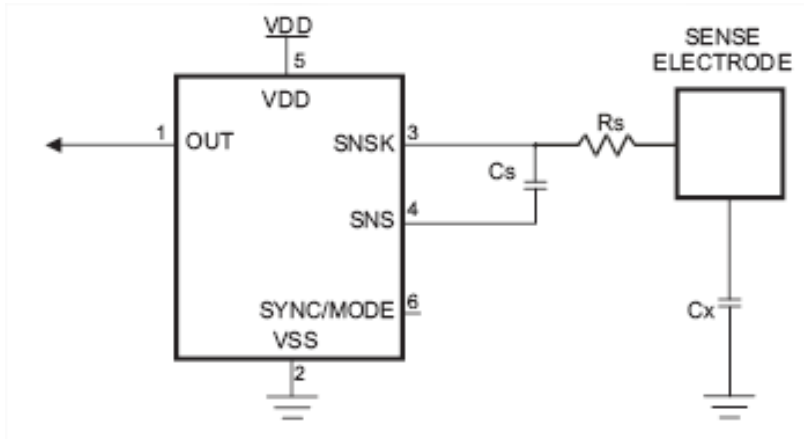


Figura A2. Diagrama de conexión del circuito integrado Atmel AT42QT1010.

El voltaje VDD es una fuente de 5 volts de corriente directa. Los valores de  $C_x$ ,  $C_s$  y  $R_s$  pueden variar dependiendo de la sensibilidad deseada para el sensor y de la forma y tamaño de los objetos que se desea usar como electrodos. Para el sistema descrito en el presente trabajo se utilizaron valores de  $R_s = 100 \Omega$ ,  $C_x = 33 \text{ pF}$ ,  $C_s = 10 \text{ nF}$ . Como regla general  $C_s$  debe ser mucho mayor que  $C_x$ , estando  $C_s$  en el orden de los nanofarads y  $C_x$  en picofarads.

La señal de salida del pin 1 es una señal digital a 0 ó 5V la cual es transferida a la computadora de control por medio de una tarjeta de adquisición de datos. De esta forma podemos detectar cuando el mono toca el objeto de una forma rápida, libre de ruido y muy precisa.

## APÉNDICE B. DISEÑO DEL SENSOR DE PRESENCIA POR LUZ INFRARROJA

El principio de operación de este sensor es muy simple. Como se explica en el texto principal la presencia de la mano del mono sobre la agarradera interrumpe el haz de luz infrarroja, lo cual cambia el estado del fototransistor de recepción y esta señal es la que se manda a la tarjeta de adquisición de datos a través de una entrada digital.

El diagrama de la figura B1 muestra el diagrama de conexión para el circuito. Los valores de resistencia utilizados fueron de  $100\ \Omega$  para R1 y  $10\text{k}\Omega$  para R2.

Se recomienda que se utilice un LED infrarrojo de larga distancia IR383, así como un fototransistor receptor PT1302B/C2.

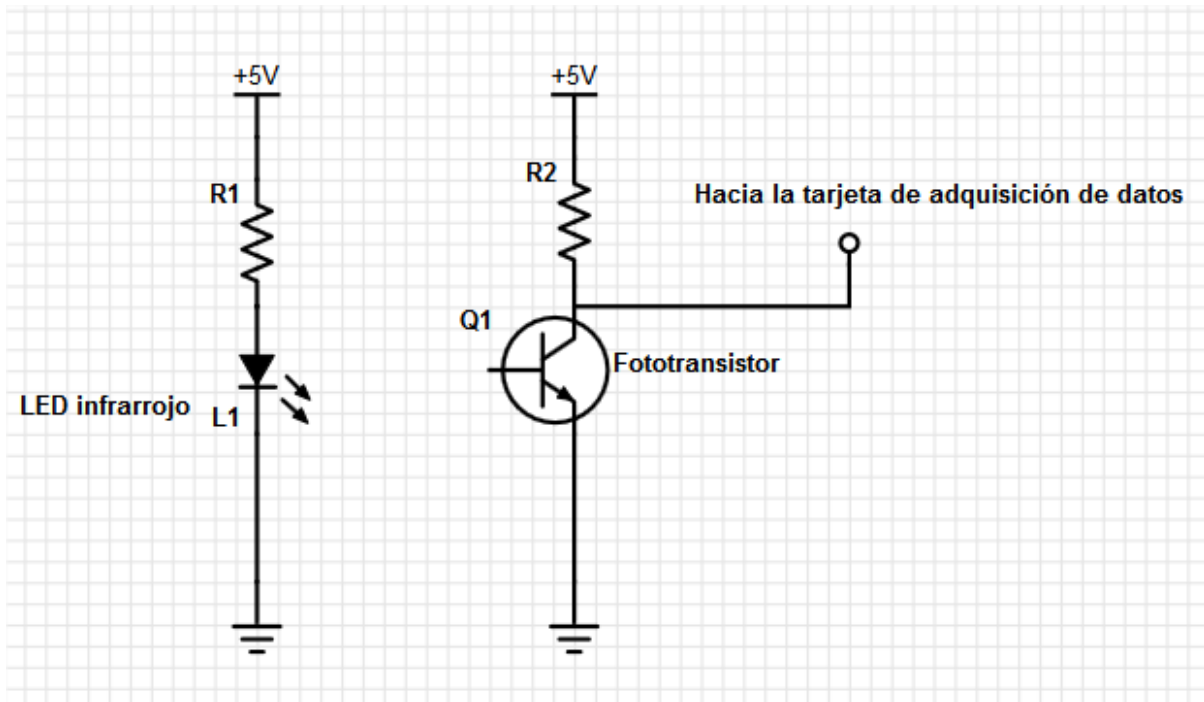


Figura B1. Diagrama de conexión del circuito para el sensor infrarrojo

## APÉNDICE C. DISEÑO DEL CIRCUITO PARA EL SISTEMA DE RECOMPENSA

El diagrama de la figura C1 muestra el circuito para el sistema de recompensa. La señal de la computadora se envía a un opto-acoplador 4N25.

Debido a que la señal a la salida del opto-acoplador se encuentra invertida, se recomienda invertir la señal digitalmente con MATLAB. Alternativamente, se puede colocar una compuerta lógica inversora 7404 a la salida del opto-acoplador para invertir la señal.

Un opto-acoplador funciona estimulando un fototransistor con un diodo emisor de tal forma que no exista contacto físico entre ambas partes del circuito y en caso de alguna falla, esta no afecte a la computadora.

La señal de salida del opto-acoplador debe ser enviada a su vez a un opto-acoplador de potencia, el cual cuando recibe la señal de entrada deja pasar el voltaje de alimentación proveniente de una fuente de 24 V a 1 A. Esto abre la válvula electromecánica y el líquido puede fluir por la manguera.

Los valores de resistencia R1, R2, y R3 deben de ser de  $330\Omega$ ,  $1k\Omega$  y  $3.3k\Omega$ , respectivamente, el propósito de estos es limitar la corriente que entra a cada uno de los componentes.

La válvula electromecánica recomendada es una SMC VX2130-02-5DZ1.



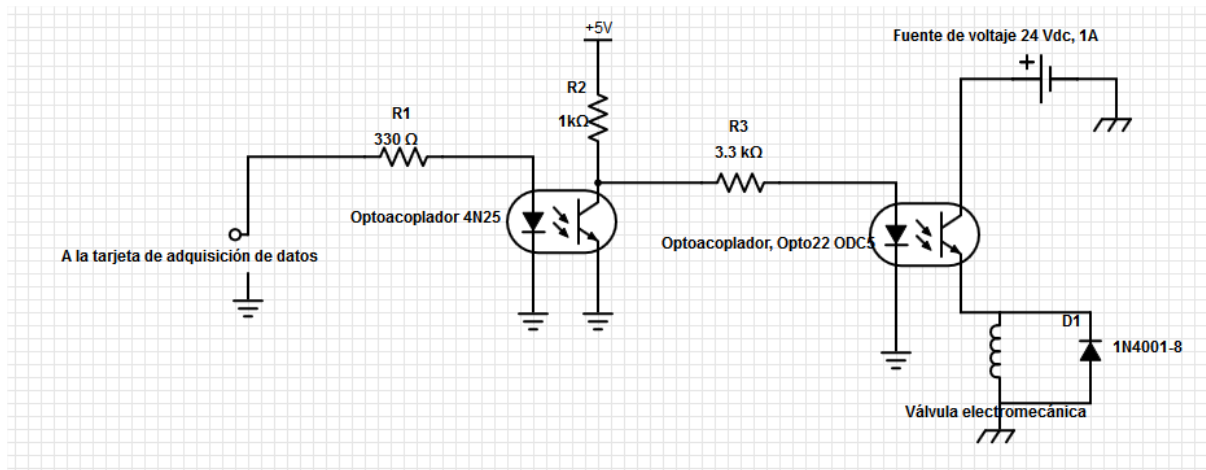


Figura C1. Diagrama de conexión del circuito para el sistema de recompensa.

## APÉNDICE D. PROGRAMACIÓN DEL BRAZO ROBÓTICO E INTERFAZ DE COMUNICACIÓN CON MATLAB

Para realizar la programación de las posiciones requeridas por la tarea, se utilizó el software *Robowin*, el cual se basa en el lenguaje de programación FORTH.

El brazo robótico puede colocarse en distintas posiciones definidas respecto a un plano cartesiano, cuyo origen es el centro de la base del robot. El robot se puede manipular utilizando una serie de comandos predefinidos en FORTH, los cuales permiten cambiar la posición, velocidad, aceleración; así como la rotación de las juntas (WAIST, SHOULDER, ELBOW, HAND, WRIST). (Figura 7) La tabla D1 presenta un resumen de los comandos más importantes.

Comando	Acción
START	Inicializa el robot.
CALIBRATE	Calibra el eje coordenado del robot.
GRIP	Cierra el <i>gripper</i> del robot.
UNGRIP	Abre el <i>gripper</i> del robot.
SPEED ?	Devuelve el factor de velocidad actual
3000 SPEED !	Coloca el factor de velocidad en 3000.
0 400.0 0 MOVETO	Mueve el robot a las coordenadas X=0, Y=400.0 mm, Z=0.

Tabla D1. Resumen de comandos en FORTH

Una posición se define por 5 valores numéricos, las coordenadas X, Y, Z; y PITCH, que es la orientación de la mano (HAND) y ROLL que es el ángulo de la muñeca (WRIST) del brazo robótico.

Utilizando los comandos se coloca el robot en la posición deseada. Una vez hecho esto se procede a guardar la posición en la memoria del controlador del robot, para esto se utiliza la ventana "Places" de *Robowin*. (Figura D1).

Para agregar una posición a la memoria del brazo robótico se presiona el botón “Add New”, se le da un nombre y el robot guarda esa posición en memoria, la ventana muestra todas las posiciones guardadas además de sus valores X, Y, Z, PITCH y ROLL.

Approach	Name	mode	X	Y	Z	PITCH	W
	TOP1	C	-210.4	99.2	-92.6	90.0	40.0
	TOP2	C	-320.9	188.7	-92.6	90.0	40.0
	DOWN2	C	-320.9	188.7	-135.0	90.0	40.0
	DOWN1	C	-210.4	99.2	-129.0	90.0	40.0
	ZMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	0.0
	BEGIN	C	-271.4	164.2	-52.6	90.0	40.0
	DMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	10.0
	VMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	20.0
	TMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	30.0
	QMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	40.0
	CMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	50.0
	SMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	60.0
	STMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	70.0
	OMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	80.0
	NMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	90.0
	CZMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	100.0
	CDMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	110.0
	CVMONO	C	-108.4	200.3	-190.7	0.0	120.0

Figura D1. Ventana *Places* de *Robwin* mostrando varias posiciones guardadas en la memoria del controlador del brazo robótico.

Una vez que cada una de las posiciones se encuentra en memoria, se procede a programar secuencias de movimientos para que el brazo robótico tome un objeto en particular, y lo coloque en la posición de exploración o para que retire un objeto y lo coloque en su posición original.

FORTH permite definir palabras, las cuales pueden contener cualquier secuencia de movimientos o comandos de FORTH. De esta forma, es posible ejecutar cualquier secuencia dada utilizando sólo un comando.

Para hacer esto se utilizan los operadores ‘:’, para iniciar la definición de la palabra y ‘;’ para terminarla, colocando en medio la secuencia de comandos que se desea ejecutar.

Por ejemplo la palabra FORWARD definida en la figura D2 lleva el robot a las posiciones STEP1, STEP2, STEP3, en forma secuencial.

```
: FORWARD  
STEP1  
STEP2  
STEP3  
;
```

Figura D2. Definición de una palabra en FORTH

Para poder controlar los comandos del robot dentro de la programación de la tarea, se realizó una interfaz de comunicación serial para poder mandar comandos al robot utilizando MATLAB. Se programó una función llamada *sendtorobot* la cual puede mandar cualquier secuencia de caracteres como una palabra de FORTH y así ejecutar, con MATLAB, los comandos correspondientes a las diferentes secuencias de movimientos definidas en el controlador del robot. (Figura D3).

Este comando utiliza como parámetros las variables *command* que es una palabra correspondiente a un comando de FORTH y *robot* que es un objeto de comunicación serial definido en MATLAB con los siguientes parámetros: puerto serial: COM6; tasa de transmisión (*BaudRate*): 19200 bits por segundo; secuencia de terminación de transmisión (*Terminator*): 'CR' y tiempo de espera de la comunicación (*Timeout*): 60 segundos. (Figura D4).

```

function sendtorobot(command,robot)

fopen(robot);
fprintf(robot,command);
pause(0.5);

while robot.BytesAvailable~=2
    fscanf(robot);
    pause(0.5);

end
fclose(robot);
end

```

Figura D3. Función en MATLAB para enviar comandos al brazo robótico.

```

robot=serial('COM6');
set(robot,'BaudRate', 19200);
set(robot,'Terminator', 'CR');
set(robot,'Timeout', 60);

```

Figura D4. Definición de parámetros de comunicación serial en MATLAB.

## APÉNDICE E. IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA EN EXPO

Para la programación de La computadora A se utilizó Expo Psychophysics; que es un programa utilizado para estudios psicofísicos, su modo de funcionamiento es a través de estados.

Cada estado puede incluir diferentes rutinas como *Surface*, para mostrar superficies en la pantalla, *RGB Texture*, para asociar una textura y color a una superficie determinada. Además existen rutinas para enviar y recibir señales digitales y analógicas (ej. *Digital Input*, *Analog Output*).

Se realizó un programa en Expo donde cada estado corresponde a un estado del sistema, la tabla E1 muestra un resumen de las rutinas utilizadas y su principal función.

<b>Rutina</b>	<b>Función</b>
Digital Input	Leer entradas digitales de los sensores de tacto e infrarrojo
Analog output	Salida analógica que informa a MATLAB el estado actual del sistema
Analogbounds	Establece un área de respuesta determinada en función de la lectura de voltaje otorgada por MATLAB
Surface	Dibuja en pantalla un área.
RGB Texture	Proporciona una textura de color RGB a un área en pantalla.

Tabla E1. Rutinas de Expo *Psychophysics* utilizadas para el desarrollo del sistema de entrenamiento conductual.

Utilizando cada una de estas rutinas se programa cada estado del sistema.

Para poder crear un programa de ejecución de estos estados, se arrastran a la parte inferior de la ventana de Expo. Es aquí donde se crea un programa de orden de ejecución además de establecer las condiciones para que estos inicien o terminen.