

# Características técnicas, metodológicas y pedagógicas para el diseño de un entrenador virtual para el aprendizaje de rutinas motoras, en personas con ausencia de un miembro superior

Pablo A. MUNÉVAR

Escuela Ciencias de la Educación. Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD  
Bogotá, Colombia.

John J. PÁEZ

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Bogotá, Colombia.

William D. VARGAS

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA  
Bogotá, Colombia.

## RESUMEN

Actualmente, las ayudas aumentativas para personas en condición de discapacidad, han permitido la evolución del diseño de prototipos que son caracterizados con un alto contenido de elaboración tecnológica y a su vez desde una perspectiva de índole pedagógica. Este proyecto tiene como objetivo principal evaluar el aprendizaje de rutinas motoras en una persona con amputación traumática a nivel del tercio distal del codo por medio de un entrenador virtual controlado por señales mioeléctricas. Este tema de investigación es de gran importancia porque prepara a la persona para el uso de una prótesis real y desde el punto de vista cognitivo, el entrenador permite crear un sistema de auto representación, el cual es un punto de convergencia en el sistema de retroalimentación visual y propioceptiva. Además, debido a la relación de manipulación – identificación – transformación de objetos, ofrece al cerebro nuevos modos de aproximarse a tareas anteriores y la posibilidad de emprender otras nuevas. Para esta investigación, se diseñó, elaboró y validó el sistema de captura y reconocimiento de las señales mioeléctricas y el modelo de aprendizaje por observación propuesto inicialmente.

**Palabras Claves:** Aprendizaje de rutinas motoras, Discapacidad, Realidad virtual, Señales mioeléctricas, Ambientes Virtuales.

## ABSTRACT

Currently, augmentative aids for people in disability status, have let the evolution of design prototypes, are characterized with high technological development and in turn from the perspective of a pedagogical nature. This project's main objective is to evaluate the learning of motor routines in a person with traumatic at the distal third of the elbow by a virtual trainer controlled by myoelectric signals amputation. This research is important because it prepares the individual for the use of a real prosthesis and, thus, on a cognitive level, the virtual coach can create a system of self-representation, which is a point of convergence in the visual feedback system and is proprioceptive. In addition, because of the relationship of manipulation - identification - transformation of objects, the brain provides new ways

of approaching prior tasks and the possibility of starting new ones. For this investigation, a system for capturing and recognizing myoelectric signals and the observational learning model proposed, was designed, developed and validated.

**Keywords:** Motor learning routines, Disability, Virtual Reality, myoelectric signals, Virtual Environments.

## 1. INTRODUCCIÓN

La presente investigación, se enfoca al aprendizaje de rutinas motoras en procesos prensiles, por medio de un entorno virtual. El aprendizaje de estas rutinas es de gran importancia a nivel cognitivo, dado que la mano permite crear un sistema de auto representación, es un punto de convergencia en el sistema de retroalimentación visual y propioceptiva, debido a la relación de manipulación – identificación – transformación de objetos, ofrece al cerebro nuevos modos de aproximarse a tareas anteriores y la posibilidad de emprender otras nuevas.

Wilson (1998) afirma que en los seres humanos la inteligencia ha estado relacionada con el diseño y construcción de artefactos. La mano ha sido la compañera fundamental del cerebro para convertir el pensamiento en acción, ya que las ideas se traducen mecánicamente en acciones, estimulando así en el cerebro la construcción de nuevos programas motores, rediseñando caminos sinápticos, procesando datos visuales para crear formas de movimiento, cambiando planos de referencia, creando representaciones jerárquicas para configurar los procesos preceptuales útiles en el control de movimientos, en otras palabras el cerebro le habla a la mano como la mano le habla al cerebro.

Ahora, uno de los problemas en el proceso de adaptación de las prótesis mioeléctricas, es el esfuerzo cognitivo que tiene que hacer el sujeto durante su apropiación y aprendizaje. Por este motivo surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las características técnicas y pedagógicas necesarias para el desarrollo de una herramienta de representación virtual de la mano humana controlada por señales

mioeléctricas, en personas con amputación traumática de miembro superior derecho?

## 2. METODOLOGÍA

La idea con este entrenador es simular algunos movimientos básicos de la mano, útiles en diversas tareas de la vida cotidiana como movimientos de pinza bidigital, pinza tridigital, agarre cilíndrico, agarre en forma de gancho y cierre de la mano en un entorno virtual, el cual debe actuar en tiempo real para la efectividad del aprendizaje. Los movimientos serán ejecutados con el mismo principio del control mioeléctrico pues es muy importante conservar la estimulación de los músculos afectados con la amputación (González, 1997). En donde el paciente logrará hacer los movimientos básicos mencionados anteriormente.

De acuerdo con los objetivos de esta propuesta se comenzó por un estudio de la fisiología del miembro superior derecho, el cual fue muy importante en términos de ubicación de la señal, luego se pasó al proceso de adquisición, amplificación, procesamiento y reconocimiento de las señales electromiográficas, para que después sea implementado en todo el entorno virtual que se elaboró. A continuación se describen a detalle cada una de estas fases de desarrollo.

### Amplificador de instrumentación.

La etapa de amplificación es uno de los procesos más importantes en la elaboración del circuito electrónico, debido a que es el procedimiento por el cual se referencia todo el proceso de la señal análoga, se ha investigado en diferentes fuentes y proyectos Sarmiento (2007) & Páez (2008), en los cuales se usa un circuito para detectar el movimiento muscular y se ha encontrado que el proceso de amplificación está basado en un amplificador de instrumentación, este es el que mejor se acomoda para el circuito debido a que sus principales características son las siguientes:

- Tiene una alta impedancia de entrada, lo que permite detectar señales muy bajas y amplificarlas.
- Tiene un buen rechazo al ruido electrónico debido a que la señal de entrada no se toma con referencia a tierra sino que se toma entre dos puntos en los cuales el ruido tiene el mismo efecto y se contrarresta.

El esquema general de un amplificador de instrumentación se especifica en la siguiente figura 1:

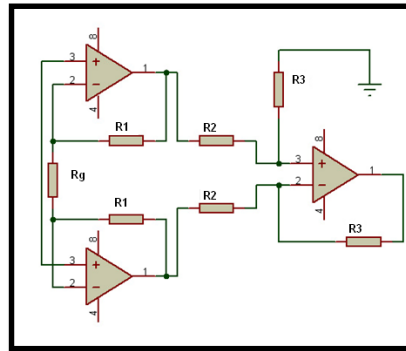


Figura 1. Amplificador de instrumentación. Fuente: El presente estudio

En donde la ganancia del amplificador de instrumentación está dada por:

$$V_{out} = (v_2 - v_1) \left( 1 + \frac{2R_1}{R_g} \right) \frac{R_3}{R_2}$$

Ecuación 1. Ecuación simplificada de la ganancia del amplificador de instrumentación. Fuente: El presente estudio

La ganancia mínima que se puede llegar a obtener en este tipo de configuración es la unidad, haciendo variable R1 es posible ajustar la ganancia, esto se hace para poder ajustar la amplitud de la señal. Los valores de las resistencias deberán mantenerse bajos para minimizar el desbalance de DC.

Existen diversos amplificadores de instrumentación en el mercado, los cuales vienen en un solo circuito integrado con resistencias internas y componentes optimizados para mejorar el rechazo al ruido, para este proyecto se tuvieron en cuenta las siguientes referencias, que se pueden observar en la tabla 1:

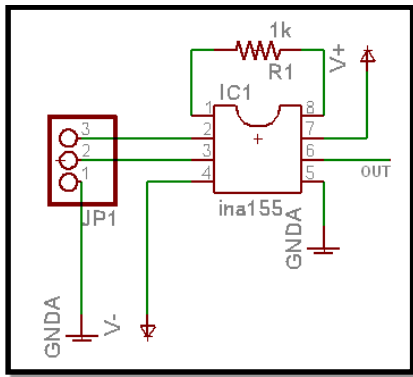
Amplificadores de Instrumentación	
INA 155	Texas Instruments.
AD620AN	Analog Devices.

Tabla 1. Amplificadores recomendados. Fuente: El presente estudio

Los 2 dispositivos se recomiendan para aplicaciones médicas de EEG, EMG y ECG.

Las dos opciones son buenas y sencillas de usar, para el proyecto se selecciona el INA 155 por su precio y su bajo rango de voltajes de trabajo, que le permite funcionar inclusive con dos baterías referencias AA. Finalmente la configuración del amplificador de

instrumentación que se siguió fue la presentada en la figura 2:



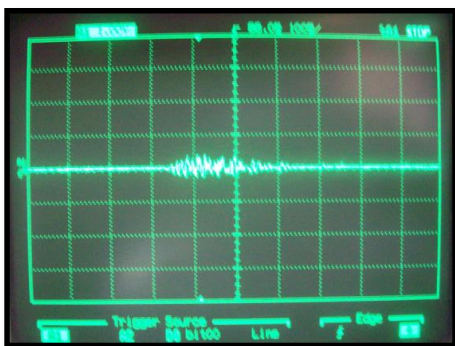
**Figura 2.** Configuración para el amplificador de instrumentación. Fuente: El presente estudio

Teniendo en cuenta las ecuaciones de diseño del INA155

$$G = \frac{400K\Omega}{10K\Omega + R1}$$

**Ecuación 2.** Ganancia del amplificador de instrumentación. Fuente: El presente estudio

La señal de salida que se obtuvo del amplificador de instrumentación, se puede ver en la figura 3:



**Figura 3.** Señal de salida del amplificador de instrumentación. Fuente: El presente estudio

### Filtros y amplificación de la señal.

En éste momento se tiene la señal EMG amplificada, sin embargo la salida del amplificador de instrumentación es una señal con un nivel muy bajo que necesita volver a ser amplificada para que se pueda manejar de manera adecuada en un comparador o un procesador, pero como conocemos existen algunas componentes de ruido electrónico las cuales se tienen que eliminar para efectos de obtener una señal pura y libre de interferencias, en este punto la señal tiene una variación en frecuencias entre 0Hz y 60 Hz, por lo que

se usa como acoplamiento un circuito RC que elimina el nivel DC que la señal puede tener y adicionalmente realiza la función de filtro pasa altos con frecuencia de corte igual a:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

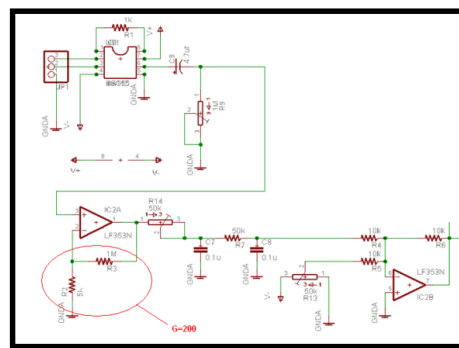
**Ecuación 3.** Ecuación frecuencia de corte del filtro pasa altos. Fuente: El presente estudio

Después de haber calculado el filtro pasa alto ahora se puede amplificar la señal, para esto utilizamos el amplificador operacional LF353, en configuración de no inversor cuya ecuación de ganancia es:

$$G = 1 + \frac{R3}{R2}$$

**Ecuación 4.** Ganancia del amplificador LF353. Fuente: El presente estudio

La configuración para la ganancia calculada se muestra en la siguiente figura.



**Figura 4.** Amplificación de la señal 200 veces. Fuente: El presente estudio

La figura 5 muestra la señal de salida del amplificador LF353.



**Figura 5.** Señal de salida del amplificador LF353. Fuente: El presente estudio

Esta señal después de amplificarla se pasa por un filtro pasa bajos para eliminar el ruido que tenga en frecuencias altas. El circuito se diseñó pensando en un filtro de RC de 2° orden, sin embargo en las pruebas realizadas se obtuvieron buenos resultados con una sola red RC, por esto se instalaron solo la resistencia R14 y el condensador C7. El condensador C8 se dejó por si se quiere un mejor filtrado, los valores finales fueron:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Ecuación 5. Frecuencia de corte para el filtro pasa bajos.  
Fuente: El presente estudio

### Circuito sumador inversor.

En este punto del circuito se tiene una señal de aproximadamente 1,2Vpp y un nivel DC cero, el circuito se realizó pensando en 2 soluciones, la primera es detectar picos en la señal e interpretarlos digitalmente desde el microcontrolador y la segunda es realizar un muestreo análogo-digital desde el microcontrolador para hacer un procesamiento digital de la señal; para realizar esta segunda opción se pensó en que la señal sea siempre positiva para facilitar la configuración del conversor análogo digital y no afecta para la primera opción, ya que para detectar picos solo se necesita un comparador de niveles. Basados en estas consideraciones se diseñó un módulo que consiste en un circuito sumador-inversor que eleva el nivel DC de la señal a 1V y con las variaciones de 1,2Vpp se tiene que la señal va a variar entre 0,4 y 1,6V, las ecuaciones para el circuito sumador son las siguientes:

$$V_{out} = -(V_{señal} + V_{offset})$$

Ecuación 6. Circuito sumador. Fuente: El presente estudio

Donde  $V_{offset}$  es el valor dado por el potenciómetro R13 de 50K, el valor calculado es de -1V pero finalmente se dejó en -1.1V, para evitar que movimientos leves de los músculos se interpreten como pulsos. De esta manera la señal que se tenía variando entre -0.6V y +0.6V, quedó con nivel DC de 1.1V y variaciones entre 0.5V y 1.7 V. El potenciómetro R13 se puede variar para detectar señales mioeléctricas bajas o por el contrario señales muy fuertes, se debe tener presente que si queda muy sensible el circuito, un simple movimiento de la mano puede detectar de manera falsa una contracción.

La figura 6 muestra la señal de salida de este bloque:

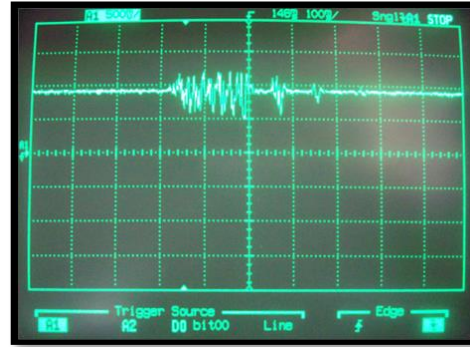


Figura 6. Salida del circuito sumador que eleva el nivel DC.  
Fuente: El presente estudio

Esta señal está conectada directamente al pin 4 del DSPic por el cual se puede hacer el muestreo y el procesamiento digital, sin embargo esta ruta se dejó como segunda opción y no fue realizada debido que con la primera opción, que es un detector de picos o nivel, fue mucho más fácil obtener los resultados esperados para el entrenador.

### Detector de nivel.

El circuito detector de nivel se implementó con un transistor aprovechando que la señal cambia entre 0.5V y 1.7V con un nivel DC de 1.1V. El circuito tiene como entrada la señal que se conecta a la base la cual siempre está polarizada (nivel DC 1V > 0.6V); cuando se genera un movimiento muscular se generan pulsos cuyos picos negativos caen por debajo de 0.6V llevando al transistor a corte generando pulsos en el colector como se muestra en la figura 7.

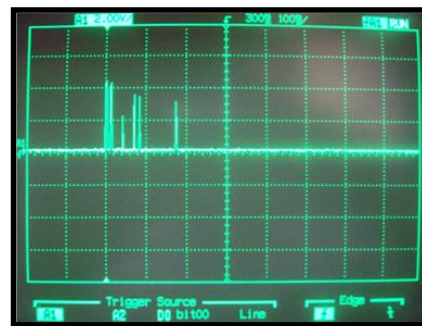


Figura 7. Señal medida en el colector de T1 cuando hay contracciones musculares. Fuente: El presente estudio

La figura 8, es una ampliación en tiempo de los pulsos de la señal:

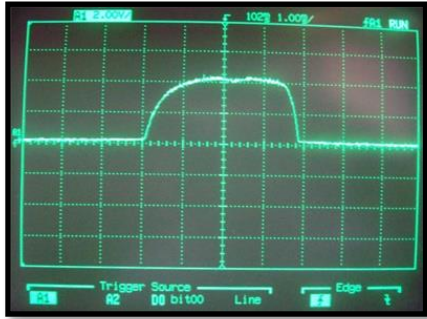


Figura 8. Ampliación de la señal medida en el colector de TI cuando hay contracciones musculares. Fuente: El presente estudio

### Representación gráfica del entrenador de prótesis virtual mioeléctrico.

Para la implementación virtual, se utilizó el software científico Matlab, el cual tiene un lenguaje de programación propio y ofrece un entorno de desarrollo integrado, característica por la cual lo hace un software ideal para la representación de un sistema mecánico tan complejo como es la mano humana, que en este trabajo de investigación se representará mediante las ecuaciones de movimiento correspondientes a los 5 movimientos descritos en los objetivos de la presente propuesta. Y en donde la interfaz Hombre – máquina será una representación tridimensional del miembro superior derecho en un mundo virtual el cuál se moverá en función de las ecuaciones de movimiento que se elaborarán en el programa mencionado.

### Cinemática directa del entrenador de prótesis virtual

Para lograr aplicar los estudios anteriormente citados, es necesario implementar modelos matemáticos que logren representar el movimiento mecánico de la mano humana, estos modelos se conocen comúnmente como el desarrollo de la cinemática<sup>1</sup>, el sistema funcionará como un modelo compuesto por cinco cadenas cinemáticas abiertas, una para cada dedo. Todas ellas comenzando desde un sistema de referencia, el algoritmo que representará los cinco robots seriales será el algoritmo de Denavit – Hartenberg debido a que éste simboliza la cinemática directa del total del modelo. Es de recordar que la cinemática directa según Barrientos (1997), tiene como objetivo encontrar una matriz de transformación homogénea que relaciona la posición y la orientación de los sistemas de cada articulación referidos a un punto de referencia, estos se explicaran en el siguiente apartado.

### Parámetros de Denavit-Hartenberg.

<sup>1</sup> La cinemática es el estudio de las leyes del movimiento sin tener en cuenta las causas que lo producen.

Según Craig (2006), para obtener el modelo cinemático directo por Denavit – Hartenberg se debe seguir el procedimiento general para la definición de los sistemas de referencia que están simplificados en la siguiente lista:

1. Identificar los ejes de cada articulación.
2. Identificar la perpendicular común entre los ejes de articulación o sus puntos de intersección.
3. Asignar el eje  $Z_i$  para que se apunte sobre el  $i$ -ésimo eje de cada articulación.
4. Asignar el eje  $X_i$  para que se apunte sobre la perpendicular común o, si los ejes se interceptan, asignar  $X_i$  para que sea normal al plano que contiene los dos ejes.
5. Asignar el eje  $Y_i$  para completar un sistema de coordenadas que cumpla con la regla de la mano derecha.
6. Seleccionar la ubicación del origen del sistema de coordenadas.

Los significados de los parámetros de Denavit – Hartenberg se desglosan a continuación:

- El parámetro  $a_i$  es la distancia entre  $z_i$  y  $z_{i-1}$  medida a lo largo de  $X_i$
- El parámetro  $\alpha_i$  es el ángulo entre  $z_i$  y  $z_{i-1}$  referido a  $X_i$ .
- El parámetro  $d_i$  es la distancia  $X_{i-1}$  a  $X_i$  medida a lo largo de  $z_i$ .
- El parámetro  $\theta_i$  es el ángulo entre  $X_{i-1}$  y  $X_i$  referido a  $z_i$ .

En este sentido se puede generar la siguiente tabla, la cual simplifica el método D-H.

Matriz Denavit - Hartenberg				
I	alfa(i)-1	a(i)-1	d(i)	theta (i)
1	alfa 1	0	0	theta 1
2	alfa 2	0	L1	theta 2
3	alfa 3	0	L2	theta 3
4	alfa 4	0	L3	theta 4
5	alfa 5	0	L4	theta 5

Tabla 2. Matriz de Denavit Hartenberg. Fuente: El presente estudio

En el modelo cinemático de Denavit – Hartenberg presentado en la figura 9, es importante conocer la posición de los dedos de la mano en función de las características de cada uno de los eslabones que componen la cadena cinemática, lo que quiere decir que conociendo los ángulos relacionados entre los diferentes eslabones, el desplazamiento entre ellos medido sobre

el eje z y la longitud de cada eslabón podemos hallar la posición y la orientación del sistema, así la cinemática directa para el desarrollo de la prótesis es la siguiente:

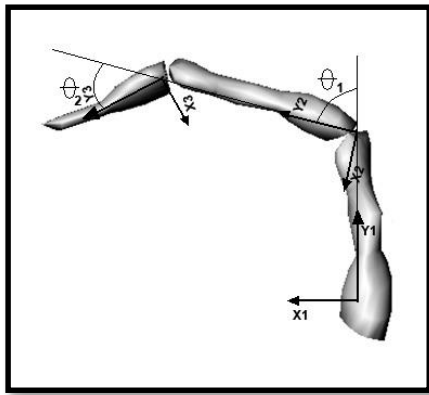


Figura 9. Modelo cinemático de un dedo de la prótesis. Fuente: El presente estudio

Módulo de realidad virtual de Matlab aplicado al simulador de prótesis virtual mioeléctrico.

La manera de elaborar la cinemática directa por el método cinemático de Denavit – Hartenberg para la mano humana, se fundamenta en las ecuaciones de movimiento y se representa el movimiento general del entrenador mediante *Matlab*. Ahora se debe implementar una interfaz gráfica, en donde se busca representar visualmente la mano mediante un programa de diseño tridimensional para lograr visualizar bien los movimientos a ejecutar y lograr una apariencia un poco más realista de la mano.

En la actualidad se tienen diferentes medios de programación en los cuales se puede simular mundos virtuales, es el caso de programas como *VrmlPad*, *3D ImageScene*, *Cosmo Player*, (entre otros) en los que se busca simular entornos en tiempo real, para la representación de la mano humana en éste caso se elabora en un programa de realidad virtual el cual tiene integrado *Matlab*, en donde su funcionamiento es compatible con la programación de las ecuaciones de movimiento. *V-Realm- Builder* es una herramienta gráfica para la edición 3D que proporciona una interfaz con sintaxis de *VRML*, una de las características más importantes de éste programa es que al ser un programa integrado con *Matlab*, se pueden trabajar paralelamente para la simulación, en función de una programación establecida. A continuación en las figuras 10, 11, 12, 13, 14 y 15 se presentan los cinco movimientos que se han desarrollado en *Matlab*.

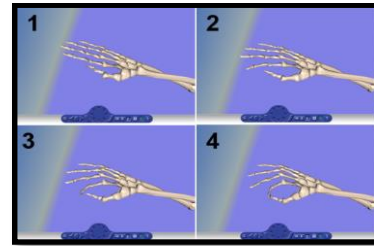


Figura 10. Simulación del movimiento de pinza bidigital de la mano en función de las ecuaciones de movimiento elaboradas en *Matlab*. Fuente: El presente estudio

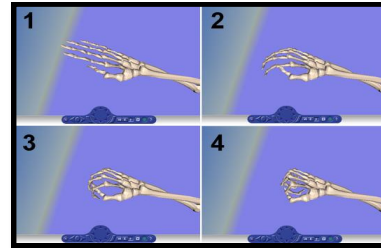


Figura 11. Simulación del movimiento de cierre de la mano en función de las ecuaciones de movimiento elaboradas en *Matlab*. Fuente: El presente estudio

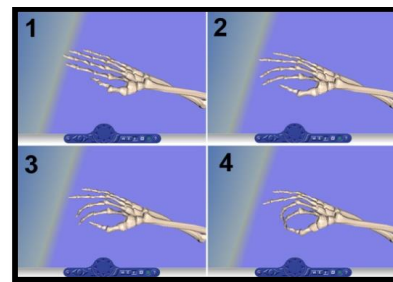


Figura 12. Simulación del movimiento de pinza tridigital de la mano en función de las ecuaciones de movimiento elaboradas en *Matlab*. Fuente: El presente estudio

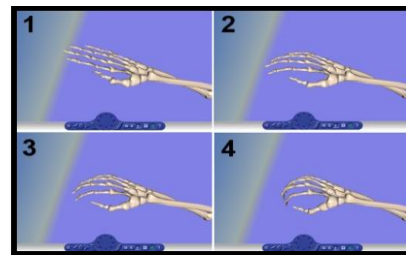


Figura 13. Simulación del movimiento de agarre cilíndrico en función de las ecuaciones de movimiento elaboradas en *Matlab*. Fuente: El presente estudio

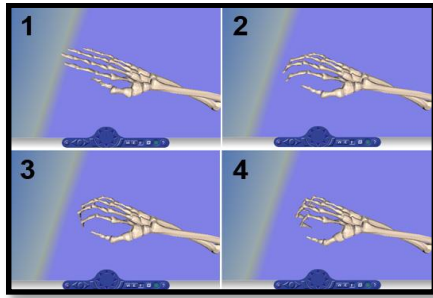


Figura 14. Simulación del movimiento agarre tipo gancho de la mano en función de las ecuaciones de movimiento elaboradas en Matlab. Fuente: El presente estudio

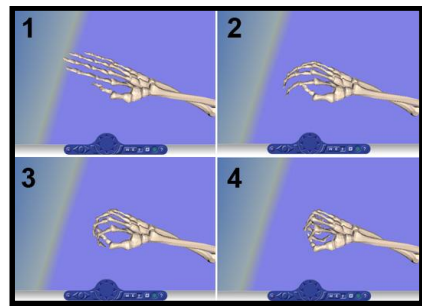


Figura 15. Simulación del movimiento de cierre de la mano en función de las ecuaciones de movimiento elaboradas en Matlab. Fuente: El presente estudio

El desarrollo de este proyecto se enmarca en el modelo de investigación cualitativa – experimental, en donde se pretende evaluar un ambiente de aprendizaje de rutinas motoras en un sujeto con amputación de miembro superior derecho a nivel del tercio proximal del antebrazo, cuando éste controla una simulación del miembro superior en un programa de realidad virtual soportado en el software *Matlab*, mediante señales generadas por el cuerpo humano.

Para la evaluación del sistema de aprendizaje se ha desarrollado una interfaz gráfica en donde se visualiza la mano humana con 15 grados de libertad y ésta representa 5 tipos de prensión básicos la cuál desde el punto de vista físico se representa visualmente al sujeto mediante la pantalla del computador y desde el punto de vista pedagógico utiliza el ambiente de aprendizaje por observación, el cuál concibe el desarrollo psicomotor como una organización jerarquizada que va desde los desplazamientos exógenos, pasando por los desplazamientos autónomos, hasta los desplazamientos corporales constructivos. (Wallon, 1997).

La metodología escogida para el desarrollo de ésta propuesta, es la metodología de análisis de protocolos verbales, según Maldonado (2001), en ésta se intenta un acercamiento al estudio de la representación de conocimiento de validez general que puede ser aplicado a los procesos cognitivos de personas que tienen limitaciones sensoriales, por esta

razón es una metodología propicia para el análisis del ambiente de aprendizaje por observación en una persona con una amputación, en esta metodología se consideran tres etapas principales en donde la primera es la recolección de la información que se verá representada en la experimentación en el desarrollo de los protocolos verbales recitados por la persona que elabora el movimiento planteado, hay que recordar que en esta experimentación la persona hace la verbalización a medida que se hace el proceso de pensamiento, este proceso se conoce como modelo de informe verbal concurrente, este ejercicio exige la reestructuración y la configuración de relaciones ante nuevas situaciones de presión (Páez, 2008); la segunda etapa es la codificación de la información, que se elabora estudiando y analizando un registro de la verbalización que previamente ha sido registrada en un formato de video para así evidenciar el proceso de aprendizaje, en función de los pasos utilizados por él para el desarrollo de la situación problema. Por último en la tercera etapa se debe presentar de manera formal la información en forma de proposiciones, este paso constituye un modelo computacional, en el cual se pueden generar nuevas preguntas que amplían la comprensión del fenómeno. (Maldonado, 2001).

Para el desarrollo de la propuesta se cuenta con una persona mayor de edad con una amputación (desde hace más de 17 años) a nivel del tercio proximal de antebrazo, de género masculino y en donde la diagnosis que presenta se describe en términos de: movilidad parcial del codo, funciones mentales globales y específicas normales, funciones sensoriales, de voz y habla normales.

El procedimiento para llevar a cabo comienza por entrenar al sujeto en el ambiente de aprendizaje por observación con las actividades correspondientes a dicho ambiente, luego se plantean 5 ejercicios de presión para que la persona los ejecute y así definir la estrategia cognitiva utilizada para el desarrollo de la tarea.

El modelo teórico para la implementación de los protocolos verbales (Maldonado, 2001), está fundamentado en la teoría del procesamiento de la información en donde los parámetros generales son:

1. Existe un conjunto de elementos llamados símbolos.
2. La estructura de los símbolos depende de la conexión de las relaciones.
3. La memoria se considera como un elemento que almacena y coordina estructuras.
4. El proceso de información inherente al desarrollo de la actividad se desarrolla teniendo en cuenta las estructuras de los símbolos antes y después del proceso.
5. El procesamiento de información requiere de un elemento denominado procesador el cual toma los procesos elementales de información, los combina y los prepara para interpretarlos.

El proceso de información se desarrolla en un ambiente de aprendizaje el cual está conformado por un conjunto de rasgos o estímulos externos que se reflejan en la representación que la persona se hace de la tarea. En este proceso hay que tener en cuenta:

1. La distribución de la información. (Punto de partida – Elaboración – Punto de llegada).
2. Naturaleza de las Restricciones. (Alternativas de prensión de la prótesis – Objetos geométricos presentados durante la experimentación).
3. Espacio del problema. (Representación que la persona hace de la tarea).
4. Complejidad de los problemas. (Cantidad de rutinas motoras utilizadas en su solución).
5. Proceso de Transferencia. (Utilización de las rutinas aprendidas en la solución de nuevos problemas).
6. Tipo de Respuestas. (Alternativas de utilización de la prótesis por parte de la persona durante la solución de un problema de prensión).
7. Retroalimentación. (Procesos meta-cognitivos en la búsqueda de alternativas en la solución de un problema de prensión).
8. Costo de errores. (En el éxito o fracaso en la solución de un problema de prensión).

El paso siguiente en la metodología de análisis de protocolos verbales consiste en transcribir el contenido del registro de la manera más fiel posible este paso se denomina como proceso de codificación y a continuación se describen los puntos principales:

1. Transcripción de los datos grabados en formato digital.
2. Análisis de Vocabulario.
  - Objetos.
  - Relaciones: permite percibir estructuras de objetos para manipularlos.
  - Operadores: al aplicarlas a los objetos genera transformaciones de posición, velocidad.
  - Control: lo que puedo modificar del estado de los objetos que manipula.
  - Procesos Evaluativos: Procedimientos de metacognición sobre lo que hace con la prótesis.
  - Objetivos: marca la dirección de la acción de prensión.
3. Segmentación y Codificación.
  - Codificación de Segmentos (Unidades Significativas).
  - Duración.
  - Codificación en Términos de lógica formal.
  - Sistema de Producción (Identificación de la estrategia).

#### **Análisis de Datos.**

Teniendo en cuenta el enfoque del ambiente de aprendizaje utilizado, se diseñan un conjunto de

actividades de prensión para el desarrollo de la investigación. Como en este caso el ambiente utilizado es el ambiente de aprendizaje por observación, inicialmente se hace una explicación visual y oral de los movimientos propuestos por el investigador, para que la persona los realice con la simulación del miembro superior en la pantalla del ordenador, después se da la instrucción para que la persona logre hacer 5 movimientos en orden aleatorio para que la persona los resuelva utilizando las rutinas de prensión aprendidas. En la fase de evaluación se consideran los siguientes parámetros:

*Éxito del ejercicio:* Es el cumplimiento de una tarea de prensión propuesta.

*Fracaso del ejercicio:* No cumplimiento de una tarea de prensión propuesta.

*Eficacia del ejercicio:* Es la relación entre el número de éxitos a alcanzar de la tarea sobre el número total de repeticiones.

La condición para que la persona vaya avanzando en el desarrollo de los ejercicios es elaborar un mismo movimiento cinco veces, de lo contrario la persona deberá volverlo a intentar hasta que se cumpla con el objetivo.

### **3. RESULTADOS**

En la primera etapa del ambiente de aprendizaje por observación, se busca informar al sujeto el funcionamiento general del entrenador, las restricciones que se deben tener, y los tiempos que el sistema reconoce para obtener una contracción válida, además se procede a la distribución de los electrodos, en los músculos de mayor actividad mioeléctrica, como se muestra a continuación:



*Fotografía 1: Posición de los electrodos. Fuente: El presente estudio*

Según el esquema que se ha planteado para la elaboración de la experimentación, en la segunda etapa, se hace una explicación visual y oral de los movimientos exógenos planteados. En donde la persona por medio de la observación y una explicación verbal por parte del experimentador, comprende cómo se controla la imagen. De esta manera tenemos la siguiente lista:

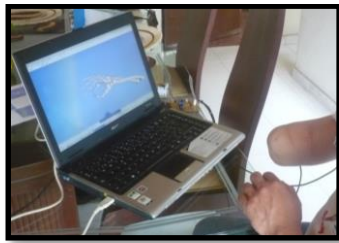
*Pinza bidigital (una contracción muscular).*



*Pinza tridigital (dos contracciones musculares).*  
*Agarre cilíndrico (tres contracciones musculares).*  
*Agarre en forma de gancho (cuatro contracciones musculares).*  
*Cierre de mano (cinco contracciones musculares).*

En esta primera parte de la experimentación el objetivo principal es que la persona aprenda a hacer los movimientos de la lista anterior. En este entrenamiento la persona aprende a hacer un cierre en pinza bidigital en el simulador. Para poder establecer si la persona aprendió el movimiento, éste debe hacer 5 repeticiones correctas de cada movimiento consecutivamente, de lo contrario se debe comenzar el ejercicio nuevamente hasta que lo pueda lograr.

La fotografía 2, presenta el entrenamiento de la persona durante el aprendizaje de la rutina motora para el movimiento de pinza bidigital.



Fotografía 2: Entrenamiento del movimiento de pinza bidigital. Fuente: El presente estudio

A medida que se va avanzando en los ejercicios, el nivel de complejidad va aumentando, dado que la cantidad de contracciones es mayor para la generación de cada movimiento. Es interesante analizar como a medida que aumenta la curva de aprendizaje, la persona va a automatizando los movimientos y los genera de manera más rápida.

En la Gráfica 1 se presenta el resumen de los intentos realizados en cada movimiento v/s los 5 movimientos:



Gráfica 1. Resumen del progreso del total de los ejercicios en la primera etapa de entrenamiento. Fuente: El presente estudio

$$\text{Eficacia} = \frac{\% \text{ Movimientos elaborados}}{\% \text{ Movimientos a elaborar}}$$

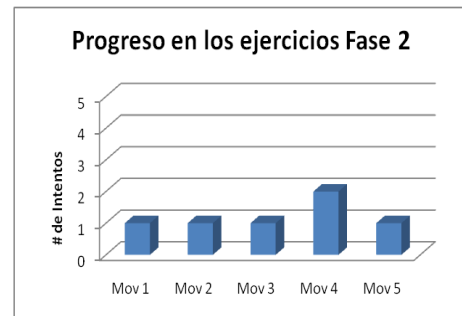
Ecuación 7. Eficacia del aprendizaje en la fase 1. Fuente: El presente estudio

$$\text{Eficacia} = \frac{40}{100}$$

Eficacia del aprendizaje en la fase 1 = 40%

En la gráfica anterior, se observa que al principio de la experimentación la persona tenía que hacer más intentos para lograr el objetivo, lo que se considera comprensible debido a que estaba en etapa de aprendizaje y era poco probable que respondiera efectivamente con todas las contracciones adecuadamente en la primera vez, sin embargo a medida que la persona va practicando el ejercicio, vemos que en los movimientos 4 y 5 los intentos cada vez van disminuyendo. De acuerdo a los datos obtenidos, se determinó una eficacia del 40%.

Durante el desarrollo de la fase 2, se evidencia un buen manejo en el control del dispositivo, solo se tiene un error en el movimiento número 4 y fue debido a una distracción momentánea de la persona, en la siguiente gráfica se analiza que el aprendizaje respecto a la fase 1 se ha mantenido y se considera como buena dado que la eficacia aumento al 80%.



Gráfica 2. Resumen del progreso del total de los ejercicios en la fase 2. Fuente: El presente estudio

$$\text{Eficacia} = \frac{80}{100}$$

Eficacia del aprendizaje en la fase 2 = 80%

#### 4. CONCLUSIONES

Se logró diseñar en un ambiente virtual la representación del miembro superior derecho y controlarlo con señales mioeléctricas, para que las personas con este tipo de amputación puedan ejercitar el miembro afectado de una manera fácil y práctica, el ambiente virtual utilizado fue un entorno de realidad virtual que trae incluido *Matlab*, en el cuál se pudo crear una interfaz interactiva y se pudo evaluar en un ambiente de aprendizaje.

Se logró representar gráficamente el miembro superior derecho de una persona en un programa de realidad virtual para llevar a cabo una simulación de 5 movimientos de la mano humana que son controlados por impulsos eléctricos provenientes del brazo de una persona.

El ambiente de aprendizaje por observación se evaluó en cada una de sus fases por 5 ejercicios de prensión, en donde básicamente se medía la eficacia del aprendizaje mediante la relación entre el porcentaje total de contracciones elaboradas sobre el porcentaje de contracciones a elaborar, teniendo como resultado en la fase 1 una eficacia del 40% y en la fase 2 una eficacia del 80%, con estos resultados se ve claramente que en el paso de una fase a la otra existe un aumento, de esta manera se comprueba que después de un corto entrenamiento en la interfaz, la persona al mejorar la eficacia está evidenciando la evolución del aprendizaje, de esta manera se coincide con el planteamiento hecho por Sicilia y Manuel (2007), cuando argumentan que el aprendizaje, en general, supone un proceso de modificación de la conducta, como consecuencia de la práctica.

De acuerdo con las pruebas realizadas al circuito, se tuvo como resultado que todas las personas que se conectaron los electrodos e hicieron los diez movimientos y la persona amputada en la experimentación sufrieron de cansancio en el transcurso del ejercicio y coincidieron en que es un buen ejercicio para ejercitar el músculo, pues en su mayoría sintió dolor muscular al otro día de la prueba, lo que da por pensar que si el ejercicio es continuo y rutinario podría ser un buen método para ejercitar el miembro de la persona amputada y efectivamente poder tener un mayor control de dispositivos externos controlados por este tipo de señales.

La representación del sistema óseo del miembro superior derecho no fue la mejor idea, pues en la experimentación la persona le pareció muy impactante la imagen y sugirió que fuera cambiada, de esta manera si se quiere avanzar en el desarrollo del entrenador éste debe representar el sistema tegumentario de la mano, para que tenga una apariencia más realista y la persona se sienta más cómodo con la interfaz.

El mundo virtual representado en *Matlab* fue de gran ayuda para retroalimentar el control que se tenía en cada contracción, sin embargo el tiempo de respuesta era bastante largo y esto generaba distracción en el ejercicio, para esto es bueno buscar un comando o una rutina en *Matlab*, que reduzca el tiempo de lectura del puerto, de manera que cuando el DSPic envíe los datos, inmediatamente el programa elaborado en *Matlab* los reconozca y la ejecución del movimiento sea más rápido, con esto se ganaría habilidad en el aprendizaje de las rutinas motoras preestablecidas.

La memorización de los ejercicios de prensión y el número de contracciones se llevó a cabo cuando la

persona entro en la fase 2, solo en este instante fue llevada a cabo la apropiación de la información pues sintió la ausencia de la hoja de referencia, y se preocupó por recordar los movimientos v/s el número de contracciones, el experimentador solo tuvo que apoyarlo en un movimiento de prensión, y en el resto del proceso no tuvo sino un solo error, de esta conclusión se desprende la idea que tiene Rosenzweig (1997) sobre el aprendizaje y la memoria, en la medida que se confirma la afirmación que el autor comenta cuando habla de que cada vez que la persona aprende algo se necesita de una memoria para evocar lo aprendido esta se refleja en el protocolo verbal de la fase de movimientos autónomos.

En el proceso de aprendizaje la persona iba evaluando las diferentes formas de hacer una contracción válida. Buscando una rutina estándar para todas las contracciones, la rutina que más le funcionó fue hacer las contracciones mientras miraba el LED, luego de fijarse que todas estaban bien hechas miraba la interfaz para corroborar que el movimiento si era el elegido. Esto confirma en primera medida la importancia que tiene el LED indicador y como segunda medida ratifica que la persona utiliza bien el modelo teórico de aprendizaje motor correspondiente al procesamiento de la información (Páez, 2008) pues primero la persona se tomaba el tiempo para hacer un análisis de estímulos (perceptivo) esto se evidenciaba cuando analizaba el ejercicio a ejecutar de tal manera que lo representaba con la mano izquierda, luego de acuerdo con la información recibida daba orientación a la posible respuesta (decisional), esto se evidencia cuando repetía el número de contracciones que tenía que hacer en voz alta y por último el mecanismo de ejecución (en este caso los músculos) coordinaba las acciones pertinentes para llevar a cabo el movimiento.

El análisis y sistematización de protocolos verbales es una estrategia cognitiva que permite llevar al contexto de lo real, procesos que nacen en la percepción, se procesan hacia la toma de decisiones y posteriormente se llevan a ejecutar acciones que solucionan problemas del individuo.

## 5. REFERENTES BIBLIOGRÁFICOS

- [1] Aldana Callejas, A. (2006). *Obtención y análisis de señales bioeléctricas, apoyados en el diseño e implementación de un electromiógrafo virtual*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- [2] Alonso A, A. (2002). *Entrenador de mioeléctrico prótesis para amputados entre brazo y mano*. España: Universidad de Valladolid.
- [3] Antonio O. S & Martínez M. (1965). *Comportamiento motor. Modelos actuales, su aplicación al aprendizaje de habilidades en el aula de educación física*.
- [4] Barrientos, A. (1997). *Fundamentos de robótica*. España: Universidad Politécnica de Madrid.

- [5] Centro de Investigaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2001) *Sistema electrónico de señales mioeléctricas para el control de prótesis mioeléctrica de mano*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [6] Craig, J. J. (2006), *Robótica*, Editorial Pearson.
- [7] Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas DANE, *censo general 2005*
- [8] Fonseca, V. Da. (2004) *Psicomotricidad: Paradigmas del estudio del cuerpo y de la motricidad humana*.
- [9] Feuerstein, R. (1998) *The theory of Structural Cognitive Modifiability. De: Learning and Thinking Styles: Classroom Interaction*. NEA Professional Library, National Education Association, Washington, D.C..
- [10] García González, M. T. (1998). *Potenciales bioeléctricos origen y registro*. México.
- [11] González, R. (1997). *Rehabilitación Médica*. España: Elsevier España.
- [12] Guzmán A. & Torres V. (2007). *Pinzas y agarres privilegiados según perfil ocupacional en el diseño de una mano robótica*, artículo en preparación.
- [13] Harvey D & Longstaff B. (2001). *The Development of a Prosthetic Arm*. Adelaide. The University of Adelaide.
- [14] Julio B. de Quiroz, (1979), *Lenguaje, Aprendizaje, Psicomotricidad*. Editorial Panamericana.
- [15] Maldonado, L. F. (2001). *Análisis de Protocolos: posibilidad metodológica para el estudio de procesos cognitivos*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- [16] Merletti, R. (2004). *Electromyography: physiology, engineering and noninvasive applications*. Wiley-IEEE.
- [17] Miralles, R. (2001) *Valoración del daño corporal en el aparato locomotor*. Editorial: Masson.
- [18] Muñoz B, E. (2003). *Aplicaciones de las Señales Mioeléctricas para el Control de Interfaces Hombre – máquina*. Popayán: Universidad del Cauca.
- [19] Orsborn A (2006) *Simulation of an Above-Elbow Myoelectric Prosthetic Arm for Development of an Implanted Myoelectric Control System*. Western University.
- [20] Páez R, J. (2008). *Aprendizaje de Actividades Motoras en Procesos Prensiles con el uso de una Prótesis Mecatrónica Controlada por Señales Mioeléctricas en Personas Amputadas entre Codo y Muñeca*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- [21] Peter Driessen, (2003), *The Experimental Portable EEG/EMG Amplifier*. University of Victoria.
- [22] Rosenzweig, M. (1997). *Psicología Fisiológica*. McGraw-Hill.
- [23] Sarmiento L, C. (2007). *Diseño de una prótesis para personas amputadas de mano y muñeca*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- [24] Suarez, R. (2007). *Preensión de objetos en Robótica*. España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- [25] U.S. Department of Health and Human Services, (1992), *Selected Topics in Surface*
- [26] National Institute for Occupational Safety and Health (1992). *Electromyography for use in the Occupational Setting: Expert Perspectives..*
- [27] Fonseca, Víctor Da (2004) *Psicomotricidad*. Editorial Trillas.
- [28] Vivas A, & Aguilar E. (2007). *Modelado Geométrico y Dinámico de una Prótesis de Mano Robótica*. Popayán: Universidad del Cauca.
- [29] Wallon H. (1997). *Los estadios en la psicología del niño*. Buenos Aires: Ediciones nueva visión.
- [30] Wilson, F (1998) *The Hand: How Its Use Shapes the Brain, Language, and Human Culture*.