

## Ambiente Robótico Lúdico para Terapias de Rehabilitación de Pacientes Pediátricos con Lesión del Miembro Superior

Jairo A. Acevedo-Londoño <sup>a,\*</sup>, Eduardo Caicedo-Bravo <sup>a</sup>, Javier F. Castillo-García <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de ingeniería, PPIEE, Universidad del Valle, Grupo de investigación Percepción y Sistemas Inteligentes PSI, Calle 13 # 100-00, Cali, Colombia.

<sup>b</sup> Programa de ingeniería electrónica, Universidad Santiago de Cali, Calle 5 # 62-00 Pampalinda, Cali, Colombia.

### Resumen

Este trabajo presenta una propuesta de asistencia para las terapias de rehabilitación de niños con lesión del miembro superior, basada en el desarrollo de un ambiente lúdico de asistencia tecnológica, cuyo objetivo es contribuir al aumento del beneficio de las terapias, en cuanto a la motivación y avance en el componente de rehabilitación físico. Este ambiente se denominó SpinBOT, y está compuesto por: un guante didáctico instrumentado con un acelerómetro, un módulo de control, una plataforma robótica y una herramienta de visualización. Se seleccionaron 4 sujetos de estudio, divididos en dos grupos, grupo objetivo y grupo de control. La intervención de la terapia consistió en el desarrollo de 3 tareas durante 4 semanas y 2 sesiones por semana. Mediante la valoración GAS, (del inglés: "Goal Attainment Scale") se observó el progreso del uso operativo del robot, lo que ayudó en la motivación para asistir a las terapias; además de, generar habilidades físicas y cognitivas.

### Palabras Clave:

Discapacidad, Robótica asistencial, Extremidad superior, Ingeniería, Robótica, Terapia, Rehabilitación.

### Playful Robotic Environment for Rehabilitation Therapies of Pediatric Patients with Upper Limb Disability

### Abstract

This project presents a proposal to assist the therapies for the children's rehabilitation with upper limb injury, based on the development of a playful environment for technological assistance, with the goal of improving patient participation and motivation, to benefit and advance the rehabilitation patient's therapies with upper limb disability. This environment was called SpinBOT, and consists of: a didactic glove instrumented with an accelerometer, a control module, a robotic platform and a visualization tool. Four study subjects were selected, divided into two groups, target group and control group. The intervention of the therapy consisted in the development of 3 tasks during 4 weeks and 2 sessions per week. Goal attainment scaling indicated improvement in the target group in operational competence of the robot, which facilitated the motivation to attend therapies. In addition, therapy with the robot simultaneously helped generate physical and cognitive skills.

### Keywords:

Disability, Assisted Robotics, Upper limb, Engineering, Robotics, Therapy, Rehabilitation.

## 1. Introducción

La condición de discapacidad en pacientes pediátricos ocasiona afectación en la calidad de vida, como la restricción de acceso a la educación. Estos pacientes en estado de discapacidad, generalmente tienen dificultades en su salud, bajo rendimiento educativo, menos oportunidades económicas y mayor pobreza en su adultez frente a personas sin discapacidad; como asegura la OMS (WHO, 2016). La rehabilitación tradicional aumenta considerablemente el estrés del paciente de pediatría, y muchas veces no satisface sus necesidades; así como, ser insuficiente para la rehabilitación

motora intensiva. Muchas veces estas terapias tradicionales provocan un alto grado de desmotivación, dando como resultado que los objetivos del tratamiento no se alcancen. Es bien conocido que, para la recuperación del paciente, debe permitírsele jugar un papel activo y motivador en su proceso de rehabilitación.

La robótica es un campo de la ingeniería que puede contribuir a solucionar esta problemática. Este campo presenta un gran desarrollo y está siendo aplicado en gran diversidad de escenarios y campos de acción humanos, tal como ha venido ocurriendo en el campo de la rehabilitación (Hillman, 2004). Fundamentalmente, con el fin de mejorar de manera

\*Autor para la correspondencia: jairo.acevedo@correounivalle.edu.co

significativa la calidad de vida de pacientes y asistir importantes tareas como: Rehabilitación del accidente cerebro vascular (Colombo et al., 2005) y cognitiva (Frank Lopresti et al., 2004), rehabilitación motora de pacientes que han sufrido accidentes de miembros superiores (Maciejasz et al., 2014) y asistencia robótica para diferentes tareas. Se han desarrollado una gran cantidad de sistemas robóticos para la rehabilitación del miembro superior, que permiten realizar terapias mediante tareas repetitivas en entornos controlados, que asociados a software especializado consiguen mantener una alta motivación del paciente. Sin embargo, hay pocos desarrollos para población infantil (Acevedo et al., 2017). Debido al escaso número de aplicaciones para niños, algunas plataformas de rehabilitación para adultos están siendo utilizadas con población infantil; estas son: AMADEO® (Sale et al., 2012), PABLO® (Seitz et al., 2014), DIEGO®, ARMEO® spring (Colomer et al., 2013), y el sistema YouGrabber (Wille et al., 2009). En general, las primeras aplicaciones en niños tenían el propósito de estudiar la interacción con terapias asistidas por robots (Harwin et al., 1988; Hogan et al., 1992), con el fin de observar la aceptación por parte del paciente y el terapeuta. Por ejemplo, en el año 1988 Cook y colaboradores (Cook et al., 1988), desarrollaron un sistema que permitió explorar el ambiente por parte de niños en condición de discapacidad usando un brazo robot. Albert Cook (Cook et al., 1990) ha sido uno de los investigadores más productivos en este campo, con múltiples trabajos reportados en la literatura como: proyectos orientados a la asistencia en tareas cotidianas (Cook et al., 2002), el juego (Cook et al., 2010) e interacción con un robot en el aprendizaje de niños con discapacidad física severa (Cook et al., 2005). Otros autores como, Harwin, Ginige y Jackson (Harwin et al., 1988) desarrollaron un sistema basado en un robot de bajo coste y un sistema de visión artificial para ejecutar tareas educativas, donde se observó la motivación por el uso del robot y el aumento de la capacidad de hacer tareas imposibles sin éste. Por otro lado, este proyecto se basó en el análisis y revisión sistemática hecha por Acevedo et al. (2017); aunque, son pocos los trabajos reportados en la literatura, se verificó que incluyeran información metodológica sobre los criterios de inclusión (edad, diagnóstico, habilidades, nivel de desarrollo motor y cognitivo), protocolo de terapia, duración de la terapia, escalas funcionales de evaluación y métodos de análisis de la información.

Debido a esto, el propósito de este trabajo, es describir el diseño e implementación de un ambiente robótico denominado SpinBOT, que permitió abrir nuevas vías terapéuticas para las actividades de rehabilitación de niños con lesión del miembro superior, y facilitó la valoración del avance en las terapias del paciente, en cuanto a la motivación y beneficio. Estos resultados se consiguen, mediante una valoración inicial y final por el área de psicología de la institución donde se hizo este proyecto. Además, la evaluación de las actividades, se hizo con la escala de valoración de objetivos (GAS), donde se observó, cómo, los pacientes aprendieron a operar los módulos del robot, lo que finalmente ayudó en la motivación por asistir a sus terapias. También, con el fin de evaluar la usabilidad del sistema desarrollado, se utilizó la Escala de Evaluación de la Usabilidad (del inglés SUS: "System Usability Scale").

El resto del artículo se encuentra distribuido por secciones de la siguiente manera. En la segunda sección, "Desarrollo del ambiente robótico lúdico SpinBOT", se abordan aspectos de diseño, como los componentes de un ambiente robótico de bajo



coste, su metodología de control y descripción del protocolo de pruebas. En la tercera sección, se encuentran los "Resultados", donde se presenta la evaluación con las escalas GAS y SUS asociadas al alcance de los objetivos de las terapias y la usabilidad del sistema como plataforma para terapias de rehabilitación. En la sección cuatro, se encuentra la "Discusión" de los resultados. La sección cinco, son las conclusiones de este proyecto.

## 2. Desarrollo del ambiente robótico SpinBOT

### 2.1. Especificaciones de diseño

El ambiente robótico lúdico SpinBOT, Figura 1. Se diseñó como un vehículo semi-autónomo disfrazado de puerco espín, como se aprecia en la Figura 1.a, para brindar un aspecto lúdico; así como, generar empatía con el paciente y facilitar el juego simbólico. A través de tres actividades, se busca desarrollar habilidades motoras mediante el progreso de los ángulos activos de movilidad articular del miembro superior, tales como: flexoextensión de muñeca y pronosupinación de antebrazo. Asimismo, el paciente tiene realimentación óptica de 2 vías, una del guante didáctico presentado en la Figura 1.d, ubicado en el miembro lesionado que, cuando ejecuta un movimiento se enciende un led RGB y del robot SPINBOT que se mueve cuando el paciente hace los movimientos de flexoextensión de muñeca y pronosupinación de antebrazo. Como se puede apreciar en la Tabla 1, el niño tiene acción de control sobre el robot, mediante las medidas angulares hechas con un acelerómetro ubicado en el guante. Debido a esto, según la mano donde se ubique el guante; y si, el movimiento del miembro superior supera los valores  $M$  obtenidos en la auto calibración inicial, la dirección del vehículo semi-autónomo SPINBOT cambia.

Tabla 1: Movimientos paciente-guante y del guante-robot

Botón	Movimientos del miembro superior (guante didáctico)	Dirección del vehículo semi-autónomo SPINBOT
 <b>Botón #1</b> (Habilita robot, Izquierda-derecha)	Pronación de antebrazo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mano derecha – Giro hacia la izquierda (←).</li> <li>Mano izquierda – Giro hacia la derecha (→).</li> </ul>
	Supinación de antebrazo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mano derecha – Giro hacia la derecha (→).</li> <li>Mano izquierda – Giro hacia la izquierda (←).</li> </ul>
 <b>Botón #2</b> (Habilita robot, atrás-adelante)	Flexión de muñeca	<ul style="list-style-type: none"> <li>Robot Adelante (↑)</li> </ul>
	Extensión de muñeca	<ul style="list-style-type: none"> <li>Robot Atrás (↓)</li> </ul>

Es decir, en una mano va ubicado el guante didáctico, y con la otra se controla el módulo de la Figura 1.c, el cual es una interfaz de hardware que da interacción con el usuario, y permite una acción cognitiva con relación al movimiento del robot. Para empezar la actividad, se presiona el botón deseado para conducir al robot en la dirección atrás-adelante o izquierda-derecha; aunque se realice algún movimiento con la mano, sino se ha habilitado la

dirección deseada presionando alguno de los botones del módulo de control, el robot permanece detenido. El protocolo de experimentación implementado para el estudio y selección de las tareas a desarrollar, debió permitir la adaptabilidad al usuario final, su seguridad, optimizar el consumo energético y garantizar la aceptabilidad de la tecnología por terapeutas e instituciones especializadas en rehabilitación. Este ambiente robótico lúdico, sirve también como una herramienta de evaluación que puede

proporcionar datos sobre la comprensión de tareas cognitivas como la causalidad, secuenciación, negación y juego simbólico, como ha propuesto Forman (Forman, 1986). El ambiente diseñado, implementado y evaluado, es una herramienta para la investigación, y su uso en numerosas sesiones puede ayudar a definir las especificaciones de sistemas de bajo coste, para su uso en instituciones de rehabilitación y hogares de pacientes con discapacidad.



Figura 1: Ambiente robótico lúdico y los principales módulos que lo componen. a) Plataforma SPINBOT. b) Ambiente robótico lúdico SpinBOT en una terapia de rehabilitación en la Asociación Abrazar en Calarcá, Quindío. c) Módulo de Control. d) Guante didáctico.

### 2.2. Componentes del entorno

En la Figura 2, se aprecia el ambiente para terapias de rehabilitación SpinBOT, bajo la configuración básica del diagrama de bloques: 1) un módulo de control, 2) una plataforma robótica (denominada SPINBOT), 3) un guante didáctico, 4) un computador personal (PC) y una herramienta de visualización (SpinBOT soft 1.0).

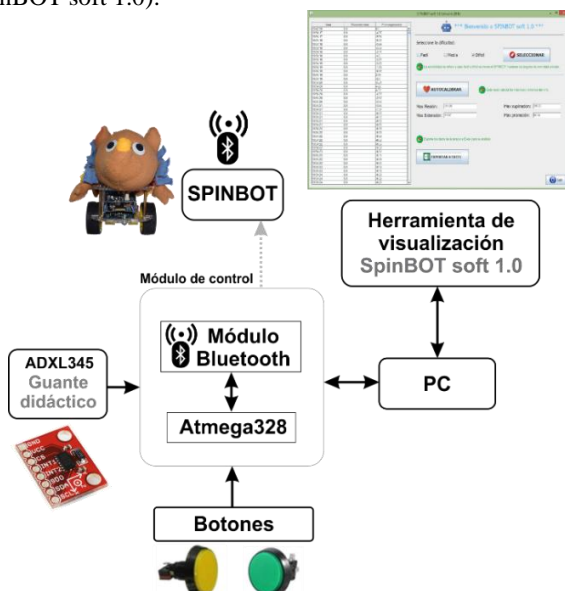


Figura 2: Diagrama en bloques del ambiente robótico lúdico de bajo coste: SpinBOT

En este contexto, el módulo de control contiene 2 botones, que además contiene el sistema de procesamiento basado en arquitectura ATmega328, y tiene como funcionalidad realizar el procesamiento de las medidas angulares enviadas desde el acelerómetro, así como; permitir la comunicación del módulo de control entre el niño y el robot vía Bluetooth. De esta manera, los

botones son el medio por el cual el niño habilita la dirección del robot (botón # 1 – Izquierda/Derecha, botón # 2 – Adelante/Atrás). El guante instrumentado con un acelerómetro digital ADXL345 ubicado en el miembro lesionado, permite habilitar el movimiento del robot (avanzar en la dirección ya seleccionada con los botones o frenar).

Por otro lado, la pista por donde fue conducido el vehículo tuvo una dimensión de 2,08 metros de largo por 1,5 metros de ancho. El robot no tuvo autonomía en la toma de decisiones y fue controlado remotamente vía Bluetooth con movimientos del antebrazo y muñeca. El robot es de tamaño reducido (aproximadamente 0,176 x 0,095 m), dotado de un par de motores que usan voltaje DC de 4,5 v. También, la plataforma robótica fue energizada con baterías de litio de referencia 18650 y el driver de potencia L298. El software para los módulos de procesamiento fue desarrollado en lenguaje de C++ y la herramienta de visualización fue implementada en lenguaje Java con en el entorno libre Netbeans (denominado SpinBOT soft 1.0). Esta herramienta de visualización, se ejecutó en un computador portátil, que estaba conectado al módulo de control, y sus objetivos fueron: 1) planificar las tareas de auto calibración y la gestión de la terapia por parte del terapeuta; así como, 2) almacenar y exportar en un histórico en formato Excel la hora, ángulos de flexoextensión de muñeca y pronosupinación de antebrazo.

### 2.3. Diseño de funcionamiento del entorno

El vehículo SPINBOT, se usó para resolver el problema de coordinar múltiples variables tales como la causalidad, lógica binaria, relaciones espaciales, coordinación de múltiples variables, negación; y el juego simbólico (Forman, 1986), implícitas en el recorrido de una pista con obstáculos. En este contexto, aplicando la habilidad de secuenciamiento, el paciente debe llegar al final de la pista hasta derribar una torre de bloques, en el menor tiempo posible. El terapeuta puede elegir en la interfaz de visualización 3 tareas, que corresponden a los niveles de dificultad fácil, media o difícil de la misma actividad. Esto permite que, el ambiente robótico quede en modo de espera, hasta que el

paciente presione uno de los dos botones disponibles en el módulo de control, que habilitan la dirección deseada. El vehículo se mueve cuando se ejecutan los movimientos de pronación y supinación de antebrazo; así como, flexión y extensión de muñeca, según la Tabla 1.

Asimismo, un paso importante antes de realizar las tareas propuestas en cada sesión, fue realizar el proceso denominado: "Auto calibración". Este consiste, en medir el máximo ángulo activo de pronación y supinación de antebrazo; así como, flexión y extensión de muñeca.

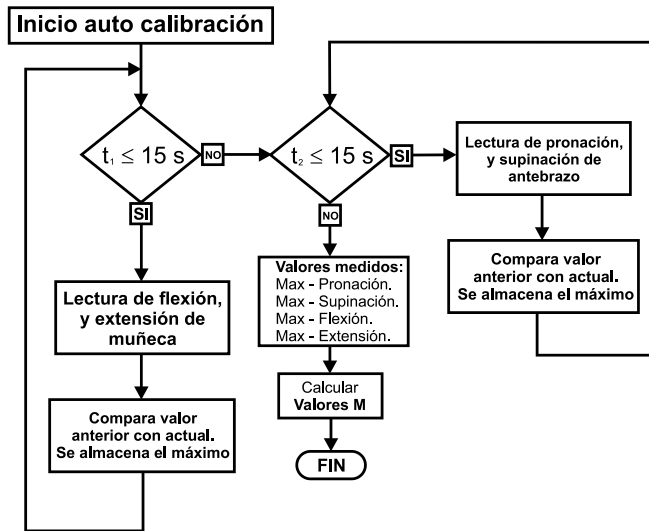


Figura 3: Diagrama de flujo de la rutina de auto calibración.

En la Figura 3, se presenta el diagrama de flujo del proceso de auto calibración. Este permite obtener en tiempo real los ángulos máximos y almacenarlos, para calcular los valores umbrales que permitan controlar el robot. Para lograr esto, el paciente es ubicado en una posición cómoda asegurando que su brazo quede firme, y que sus movimientos involuntarios no alteren las medidas. El paciente cuenta con 15 segundos para hacer el movimiento de flexoextensión de muñeca donde se calcula el máximo correspondiente; y otros 15 segundos, donde se calcula el máximo de pronosupinación de antebrazo. El proceso de auto calibración es muy importante porque, permite obtener en tiempo real y almacenar los valores de ángulos que servirán para, calcular el umbral donde el robot se mueve o permanece quieto, estos valores son denominados: "Valores M". También, fue una metodología propuesta para este proyecto por parte de los terapeutas, para hacer un seguimiento más detallado semana a semana del desempeño de los pacientes.

El umbral de valores M, es distinto para cada nivel de dificultad de la actividad, y se calcula obteniendo el 30% (fácil), 50% (medio) y 90% (difícil) del ángulo máximo. Por encima de estos valores M, el robot se mueve, y por debajo permanecerá quieto o en estado de "Freno". Los porcentajes para calcular los valores M, se seleccionaron de acuerdo a la experiencia de los terapeutas que tratan a estos pacientes.

#### 2.4. Descripción de las tareas

Como se ha comentado, para la validación del ambiente SpinBOT desarrollado, se definieron 3 tareas. Estas se basaron en conducir el robot con tres dificultades por la pista de obstáculos de la Figura 4, con el fin de controlar la posición en el sistema coordenado XY:

**Tarea 1:** El paciente debía conducir el SPINBOT de A hasta B en modo fácil, hasta derribar una pila de bloques de colores

ubicada en B, con los ángulos activos de pronosupinación de antebrazo y flexoextensión de muñeca, chocando el menor número de obstáculos.

**Tarea 2:** El paciente debía conducir el SPINBOT de A hasta B en modo medio, hasta derribar una pila de bloques de colores ubicada en B, con los ángulos activos de pronosupinación de antebrazo y flexoextensión de muñeca, chocando el menor número de obstáculos.

**Tarea 3:** El paciente debía conducir el SPINBOT de A hasta B en modo difícil, hasta derribar una pila de bloques de colores ubicada en B, con los ángulos activos de pronosupinación de antebrazo y flexoextensión de muñeca, chocando el menor número de obstáculos.

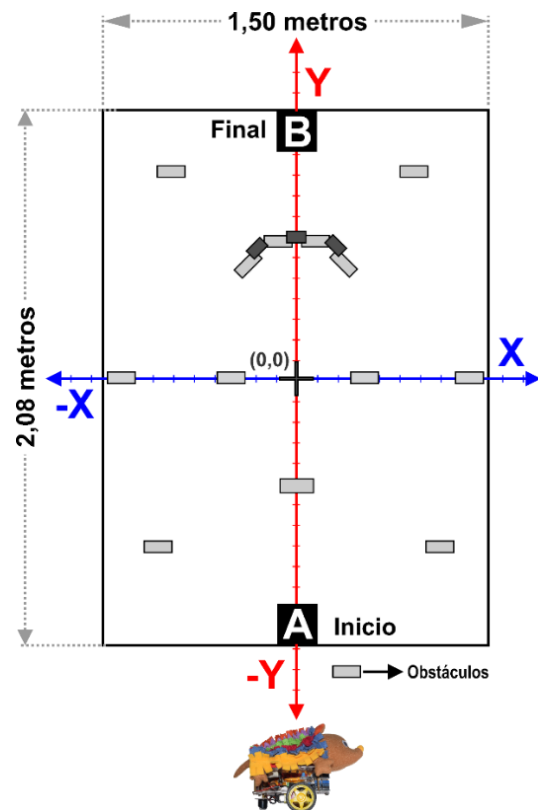


Figura 4: Pista para la navegación del vehículo semi-autónomo SPINBOT

#### 2.5. Definición de los ensayos clínicos

El ambiente SpinBOT, se adecuó en la institución de rehabilitación Abrazar, ubicada en Calarcá/Quindío en Colombia. Los pacientes potenciales, fueron invitados a participar de la investigación mediante una reunión promocional con terapeutas y acudientes. Aquellos acudientes o cuidadores interesados, firmaron el consentimiento informado de conformidad con las directrices éticas aprobadas. Cada sujeto potencial fue entonces examinado mediante un estudio piloto, y el objetivo fue: "Evaluar el desempeño del paciente frente a los módulos del sistema y al protocolo de terapia".

Una vez seleccionada la población, se dividió en 2 grupos. En un grupo, había 2 sujetos humanos con lesión del miembro superior (grupo objetivo), con quienes se hizo la intervención usando el SpinBOT y en un segundo grupo, 2 pacientes con características similares (grupo de control), quienes siguieron el tratamiento con las terapias tradicionales. Se dividió en dos grupos los pacientes, con el objetivo de comparar los resultados y comprobar la eficacia de la terapia con el ambiente SpinBOT. El tiempo de duración de la terapia tradicional y la terapia con el robot es el mismo.

Tabla 2: Descripción breve de los pacientes participantes del estudio

P	Edad	Diagnóstico / Brazo adaptado al guante	Habilidades Cognitivas	Habilidades sociales	Grupo de estudio al que pertenece
P1	12	Parálisis cerebral Espástica Derecho	Muy receptivo. Le cuesta distinguir izquierda o derecha	Muy amigable, le gusta el dialogo y socializar con los desconocidos	Grupo objetivo
P2	17	Hemiparesia e hipotonía de miembro superior. Izquierdo	Le cuesta vocalizar. Le gusta involucrarse en el desarrollo de tareas.	Es amable, muy social y le encanta compartir y cantar en voz alta.	Grupo objetivo
P3	13	Hemiparesia <b>No aplica</b>	Muy receptivo, presenta un nivel cognitivo apropiado a su edad.	Muy social, disfruta la interacción con otras personas.	Grupo control
P4	15	Hemiparesia <b>No aplica</b>	Le cuesta vocalizar. Le gusta involucrarse en el desarrollo de tareas.	Alegre pero no siempre se relaciona con facilidad.	Grupo control

En la Tabla 2, se aprecia un resumen de las características de los 4 participantes. Las intervenciones de las terapias con el grupo objetivo se realizaron 2 veces por semana, durante 4 semanas. Cada terapia tuvo una duración aproximada de 50 minutos. Además, estas sesiones se realizaron por el investigador principal con el acompañamiento de dos fisioterapeutas, así como los acudientes de los pacientes, en los horarios habituales de sus terapias. Además, estas sesiones fueron grabadas en video para un posterior análisis. Al final de la intervención con ambas terapias (tradicional y con el robot), se realizaron las valoraciones por parte del psicólogo y la fisioterapeuta; asimismo, se aplicaron algunos cuestionarios a los padres, acudientes o cuidadores de los pacientes y a los terapeutas, para conocer sus impresiones del estudio y calcular la usabilidad del ambiente robótico; así como, de la herramienta de visualización.

### 2.6 Protocolo de la terapia

En la Figura 5, se presenta el protocolo de la terapia de la siguiente manera:

**Parte 1:** Duración 15 minutos. Corresponde a la preparación previa, donde se hace estiramiento del miembro superior del paciente. Se establece si, el paciente comprendió cómo funcionan los botones y el guante, en general se hace una sola vez al inicio o las veces que se necesite antes de cada intervención.

**Parte 2:** Duración 5 minutos. Calibración del sistema, donde se hace el cálculo de los valores  $M$  correspondientes a el ángulo activo de pronación (Valor  $M_p$ ), el ángulo activo de supinación (Valor  $M_s$ ), el ángulo activo de flexión (Valor  $M_f$ ) y el ángulo activo de extensión (Valor  $M_e$ ). Después de realizar el cálculo, estos valores son almacenados en la memoria temporal del módulo de control.

**Parte 3:** Duración 30 minutos. Desarrollo de la terapia. Se le dio un reto lúdico compuesto por 3 tareas (5 minutos de descanso entre cada una) que deberá resolver utilizando los ángulos activos de movilidad articular flexoextensión de muñeca y

pronosupinación de antebrazo, que corresponden a recorrer la pista de la Figura 4 en el modo fácil, medio y difícil.

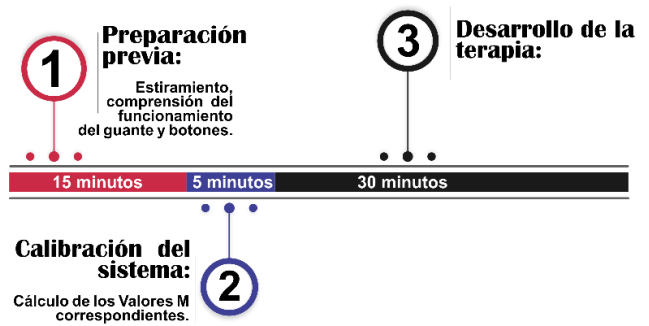


Figura 5: Protocolo de terapia con el ambiente robótico SpinBOT

### 3. Resultados

#### 3.1. Escala de valoración de objetivos

Para la evaluación de objetivos en terapia ocupacional, se utiliza la escala de valoración o consecución de objetivos (GAS), esta es una técnica para evaluar el progreso individual de un paciente en el alcance de metas u objetivos en tareas determinadas. Una actividad puede contener varios objetivos a evaluar. Fue propuesta por Kiresuk et al., (Kiresuk y Sherman, 1968), la cual es bien conocida como una técnica de valoración de resultados clínicos en áreas del campo médico, como la terapia física, geriatría, rehabilitación, intervención temprana y salud mental.

La fórmula matemática para el cálculo de la escala, se presenta en la ecuación siguiente:

$$T = 50 + 10 \frac{\sum w_i x_i}{\sqrt{(1-\rho) \sum w_i^2 + \rho (\sum w_i)^2}} \quad (1)$$

Donde:

$w_i$ : La importancia asignada a la  $i$ -ésima meta propuesta (Si todas son igual de importantes entonces  $w_i=1$ ).

$x_i$ : El nivel de logro obtenido (entre -2 y +2).

$\rho$ : La interrelación global de los resultados de la puntuación obtenida, para efectos prácticos puede asumirse como 0,3.

Por lo tanto, para evaluar las actividades hechas en la terapia con el robot, se planearon tres objetivos presentados en la Tabla 3, valorados mediante la escala GAS, donde en primer lugar, se determina la línea base, en esta etapa se establece como está el paciente, y a partir de allí, se evalúa como progresa. La línea base para el sujeto  $P1$  fue de 30,2 y para el sujeto  $P2$  de 34,6.

De acuerdo a los evaluadores, para los sujetos  $P1$  y  $P2$  se lograron puntuaciones inferiores o iguales a 50 en la primera y segunda semana. Esto pudo suceder debido a que, los pacientes iniciaban un proceso de adaptación al proceso terapéutico con el robot; no obstante, el sujeto  $P1$  mantuvo el mismo comportamiento hasta la tercera semana, progresivamente fue mejorando hasta lograr 58,8. El sujeto  $P2$  obtuvo una puntuación de 52,2 en la última semana.

#### 3.2. Escala de medición de la usabilidad

La escala de medición de usabilidad (del inglés SUS: "System Usability Scale"), es un cuestionario de diez puntos que brinda información global de la estimación de la usabilidad de un sistema electrónico o software, definida operativamente como: "La percepción de la interacción con un sistema" (Brooke, et al.,

1996). Las preguntas de SUS, han sido desarrollados de acuerdo a tres criterios de usabilidad definidos por la ISO 9241-11, como son: 1) la capacidad de los usuarios que utilizan el sistema para completar las tareas, y la calidad de las tareas (es decir, la eficacia), 2) el nivel de recursos consumidos en la realización de tareas (es decir, eficiencia), y 3) reacciones subjetivas utilizando el sistema (es decir, satisfacción), (Borsci et al., 2009).

Se aplicó la escala a un fisioterapeuta, una terapeuta ocupacional y al acudiente de un paciente que accedió a participar.

Una vez aplicada a estos 3 usuarios, se calcularon los valores de SUS, para el ambiente robótico lúdico desarrollado y la herramienta de visualización. Estos resultados pueden ser interpretados como propone Bangor y colaboradores (Bangor et al., 2009), donde se proponen unos rangos recomendados para: Inaceptable (0-64 puntos), aceptable (65-84 puntos) y excelente (85-100 puntos). La puntuación SUS para el ambiente robótico lúdico fue en promedio de 91,6 y para la herramienta de visualización de 87,6 mostrando una excelente usabilidad.

Tabla 3: Ejemplo de objetivos de GAS para el sujeto P1

Nivel de logro	Objetivo 1	Objetivo 2	Objetivo 3
-2	Conducir el SPINBOT por una pista en modo fácil. En más de 4,5 minutos de duración.	Conducir el SPINBOT por la pista en modo medio. En más de 5,5 minutos de duración.	Conducir el SPINBOT por la pista en modo difícil. En más de 6 minutos de duración. (Línea Base)
-1	Conducir el SPINBOT por una pista en modo fácil. En un tiempo menor o igual a 4,5 y mayor a 3,5 minutos. (Línea Base)	Conducir el SPINBOT por la pista en modo medio. En un tiempo menor o igual a 5,5 y mayor de 4,5 minutos. (Línea Base)	Conducir el SPINBOT por la pista en modo difícil. En un tiempo menor o igual a 6 y mayor a 5 minutos.
0	Conducir el SPINBOT por una pista en modo fácil. En un tiempo menor o igual a 3,5 y mayor a 2,5 minutos.	Conducir el SPINBOT por la pista en modo medio. En un tiempo menor o igual a 4,5 y mayor a 3,5 minutos.	Conducir el SPINBOT por la pista en modo difícil, en un tiempo menor o igual a 5 minutos y mayor a 4 minutos.
+1	Conducir el SPINBOT por una pista en modo fácil, en un tiempo menor o igual a 2,5 minutos y mayor a 1,5 minutos.	Conducir el SPINBOT por la pista en modo medio, en un tiempo menor o igual a 3,5 y mayor de 2,5 minutos.	Conducir el SPINBOT por la pista en modo difícil, en un tiempo menor o igual a 4 minutos y mayor a 3 minutos de duración.
+2	Conducir el SPINBOT por una pista en modo fácil, en un tiempo menor o igual a 1,5 minutos.	Conducir el SPINBOT por la pista en modo medio, en un tiempo menor o igual a 2,5 minutos.	Conducir el SPINBOT por la pista en modo difícil, en un tiempo menor o igual a 3 minutos.

### 3.3. Habilidades demostradas por los pacientes

Los pacientes reaccionaron positivamente ante el robot, y parecían disfrutar mientras jugaban con el SPINBOT, como se pudo observar durante el tratamiento. El robot permitió generar empatía con el niño, facilitando el juego simbólico, el cual facilitó la creación de un personaje artificial. Por esto, el sujeto *P1* nombró al robot “Camilo”, y el sujeto *P2* lo nombró “Pipe”. En este contexto, los dos sujetos fueron capaces de lograr los movimientos de supinación y pronación de antebrazo; así como flexión y extensión de muñeca.

El desempeño de los ángulos logrados por los sujetos *P1* y *P2*, podrían ser obtenidos mediante 2 tipos de análisis:

1) *Tipo 1*: Mediante la auto configuración de cada sesión. El sujeto *P1*, mostró un avance en las 3 primeras semanas, con una leve disminución de los ángulos en la cuarta semana. En el caso del sujeto *P2*, presentó un aumento progresivo en los ángulos activos, salvo en el de supinación de antebrazo, esto se debió posiblemente, a que en varias sesiones le daba poca importancia a este movimiento (SPINBOT hacia la izquierda).

2) *Tipo 2*: El análisis de los percentiles como se presenta en la Figura 6, del arreglo de ángulos almacenados como histórico en cada sesión. Para hacer el análisis de los datos obtenidos en cada sesión, se realizaron *box plot* (diagrama de caja) para las 3 actividades, por cada paciente. En la Figura 6, se grafica la tarea 1 o modo fácil del paciente 2 en las 8 sesiones. Se escogió *gráfica de caja*, porque los arreglos de ángulos contienen datos con mucha dispersión, y la desviación estándar es más alta que la media, esto quiere decir que, la media no puede hacer una caracterización adecuada de la variable estudiada, ni se puede cuantificar el resultado a un único ángulo máximo. No obstante, la mediana refleja mejor la distribución de los ángulos activos. En este caso, para el sujeto *P2*, se puede verificar la contribución de la terapia en el aumento leve y progresivo de los movimientos de pronación, flexión y extensión, y la disminución leve del movimiento de supinación para la tarea 1 (modo fácil). En ningún momento se

tuvo una degradación del logro. También, se observan algunos valores atípicos asociados a la compensación del brazo o movimientos bruscos en la actividad, estas observaciones numéricamente distantes del resto de los datos, son tenidas en cuenta en estas figuras para mejorar la calidad de los datos graficados. De esta manera, se aprecia una evolución progresiva del paciente. También, la tarea 2 (modo medio), tuvo mejoras significativas para los movimientos de flexión y extensión de muñeca, y para los movimientos de pronación y supinación de antebrazo fue muy inconstante. En la tarea 3 (modo difícil), presentó un buen desempeño en los movimientos de extensión y flexión de muñeca; por el contrario, los movimientos de pronación y supinación de antebrazo permanecieron prácticamente con una tendencia constante. El desempeño de la tarea 1 para el sujeto *P1*, no tuvo una tendencia definida en cuanto a si avanzó o no. Esto pudo ser debido a que el sujeto *P1*, posee movimientos involuntarios asociados a la distonía propia de la parálisis cerebral. En la tarea 2, el sujeto *P1*, presentó una tendencia al alza en los movimientos de flexión y extensión de muñeca y pronación de antebrazo, el movimiento de supinación no tuvo una tendencia clara. En la tarea 3, el sujeto *P1*, tuvo un incremento en todos sus movimientos, en especial extensión y flexión de muñeca.

## 4. Discusión

A través de la escala de valoración de objetivos (GAS), se pudo evidenciar que ambos pacientes pertenecientes al grupo objetivo, obtuvieron puntuaciones mayores al final del tratamiento. Al mismo tiempo, para ambos pacientes esta información se traduce en qué, semana a semana fueron progresando en el uso operativo del robot. Este resultado promete sesiones más motivadoras para los niños, y de esta manera se generó más interés que en las tareas hechas con elementos convencionales.

Los padres o cuidadores informaron que, los pacientes que utilizaron el robot, habían mejorado su atención y motivación por asistir a las terapias. El sujeto *P1* presentó mayor dominio

en su motricidad fina, al intentar un mayor número de veces amarrarse los cordones de los zapatos sin asistencia, también, logró tener mayor determinación en actividades cotidianas. Además, el mismo sujeto logró diferenciar entre izquierda y derecha. Asimismo, el sujeto P2 pudo presentar en varias oportunidades, mayor control de su mano derecha, o mayor precisión en desplazamientos pequeños, con la misma mano que presionaba los botones del módulo de control.

Al mismo tiempo, este proyecto demostró una importante diferencia entre la terapia convencional, y las terapias asistidas con robots. Desde un punto de vista global, la población

pediátrica presenta un gran interés por parte de investigadores, ya que demuestran un alto grado de interés y colaboración en las terapias de rehabilitación con robots. Lo anterior, podría justificarse por las diferencias encontradas en la motivación de los pacientes del grupo de control; debido a esto, el sujeto P3 desistió al proceso terapéutico porque, la motivación no fue alta en su terapia convencional. El sujeto P4, completó las 4 semanas de tratamiento convencional. La evaluación física inicial y final realizada por fisioterapia a los sujetos P3 y P4, mostró que el grupo de control no presentó ningún cambio en sus ángulos de movilidad articular.

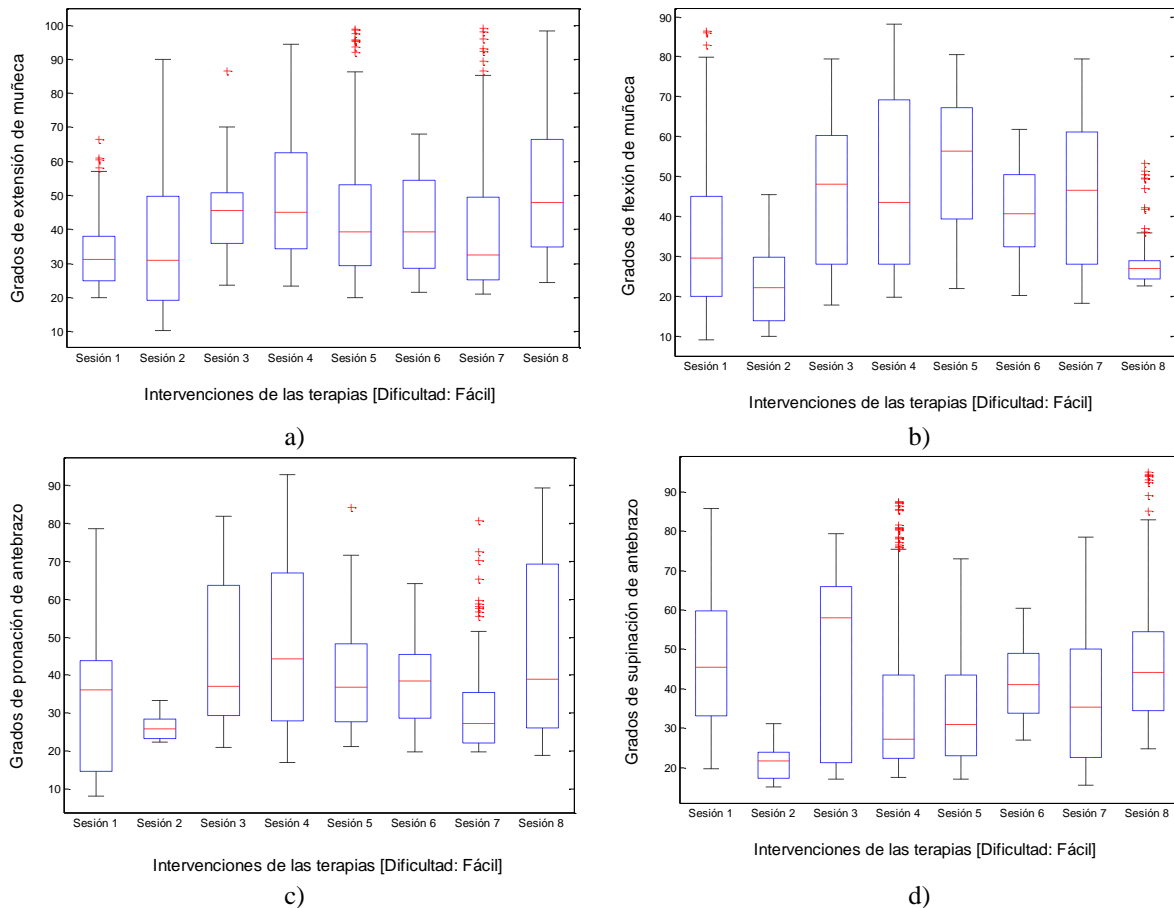


Figura 6: Box plot del arreglo de ángulos activos del brazo derecho del sujeto P1. Duración de la intervención: 4 semanas y 2 sesiones por semana. Dificultad fácil (también tarea 1). a. Grados de extensión de muñeca b. Grados de flexión de muñeca c. Grados de pronación de antebrazo d. Grados de supinación de antebrazo.

Hay varias limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados de este estudio. En un mes podría ser improbable ver cambios en los componentes de rehabilitación del paciente porque, estos apenas inician un proceso de adaptación al proceso terapéutico. Esto ocurre, debido a la barrera que impone su lesión en la motricidad, y aunque el paciente quiera realizar ciertos movimientos, su capacidad neurológica no se lo permite. Sin embargo, se propone en estudios futuros, aplicar la herramienta en pacientes con lesiones biomecánicas, porque en estos posiblemente se pueda evidenciar mayores cambios en los rangos activos de pronosupinación de antebrazo y flexoextensión de muñeca, en un tiempo corto. Otro aspecto podría ser la cantidad de pacientes, de acuerdo a la literatura médica especializada (Maciejasz et al., 2014; Tejima, 2001), los primeros trabajos que se hacen como los reportes de caso, el número de pacientes

en reducido o no existe. No obstante, cuando la tecnología pasa a fase de producción, se comienzan las pruebas de manera extensiva con pacientes. Aunque en este estudio se utilizó una muestra pequeña, se puede relacionar el paciente con niveles más bajos de función cognitiva, con una experiencia de mayor dificultad en el desarrollo de estas tareas, independientemente del grado de discapacidad física. Estas interpretaciones son coherentes con los hallazgos de Kwee y Quaedackers (Kwee y Quaedackers, 1999).

### 5. Conclusiones

El ambiente de asistencia SpinBOT, fue una solución donde, sus componentes de hardware permitieron el acceso a una herramienta de bajo coste para pacientes de escasos recursos, y facilitó numerosas sesiones de terapias interactivas.

Para lograr este fin, se construyó una plataforma robótica o SPINBOT (vehículo semi-autónomo), un guante didáctico dotado de un acelerómetro ADXL345, un módulo de control y una herramienta de visualización. La evaluación de las actividades se hizo con la escala de valoración de objetivos (GAS), donde se observó el progreso del uso operativo del robot. También, con el fin de evaluar la usabilidad del sistema desarrollado, se utilizó la Escala de Evaluación de la Usabilidad (del inglés SUS: "System Usability Scale"), obteniendo como resultado una excelente usabilidad.

Mediante este tratamiento, se logró evidenciar el desarrollo de empatía inmediata, que los sujetos de estudio mostraron con el robot; aumentando el avance de sus terapias en cuanto a la motivación y beneficios. Así mismo, los beneficios que se encontraron fueron, el desarrollo de habilidades adyacentes, tales como: Un mayor uso del miembro superior afectado, desarrollo de habilidades cognitivas, al diferenciar entre el lado izquierdo y derecho, empezar a usar las palabras "atrás", "adelante", "izquierda" y "derecha" para dar indicaciones en actividades de la vida cotidiana, y en sus sesiones de terapias convencionales. Los resultados obtenidos son muy importantes porque, muestran como la implementación de robótica lúdica, ofrece la posibilidad de aumentar la eficacia de la rehabilitación tradicional y utilizarse en una variedad de entornos, como centros de rehabilitación y viviendas; mediante la explotación de las potencialidades de las terapias asistidas por robots.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la Asesoría de la Asociación ABRAZAR, ubicada en Calarcá/Quindío Colombia. Agradecemos a su coordinadora Mónica Lorena Piedrahita, la terapeuta Julieth Calderón, al psicólogo Alejandro Valencia y a la trabajadora social Diana Lady Hurtado.

#### Conflicto de intereses

Los autores del presente artículo, indicamos que no existe conflicto de intereses. Además, este proyecto no ha recibido financiación por ninguna institución o particular.

#### Referencias

Acevedo, J. A., Bravo, E. C., & García, J. F. C. (2017). Aplicación de tecnologías de rehabilitación robótica en niños con lesión del miembro superior. *REVISTA SALUD UIS*, 49(1), 103-114.

Brooke, J. (1996). SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189(194), 4-7.

Borsci, S., Federici, S., & Lauriola, M. (2009). On the dimensionality of the System Usability Scale: a test of alternative measurement models. *Cognitive processing*, 10(3), 193-197.

Bangor, A., Kortum, P., & Miller, J. (2009). Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale. *Journal of usability studies*, 4(3), 114-123.

Cook, A. M., Hoseit, P., Liu, K. M., Lee, R. Y., & Zenteno-Sanchez, C. M. (1988). Using a robotic arm system to facilitate learning in very young disabled children. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 35(2), 132-137.

Cook, A. M., Liu, K. M., & Hoseit, P. (1990). Robotic arm use by very young motorically disabled children. *Assistive Technology*, 2(2), 51-57.

Cook, A. M., Meng, M. H., Gu, J. J., & Howery, K. (2002). Development of a robotic device for facilitating learning by children who have severe disabilities. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 10(3), 178-187.

Cook, A. M., Bentz, B., Harbottle, N., Lynch, C., & Miller, B. (2005). School-based use of a robotic arm system by children with disabilities. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 13(4), 452-460.

Cook, A., Encarnação, P., & Adams, K. (2010). Robots: Assistive technologies for play, learning and cognitive development. *Technology and Disability*, 22(3), 127-145.

Colombo, R., Pisano, F., Micera, S., Mazzone, A., Delconte, C., Carrozza, M. C., Dario, P., Mínuco, G., 2005. Robotic techniques for upper limb evaluation and rehabilitation of stroke patients. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering* 13 (3), 311-324.

Colomer, C., Baldovi, A., Torrome, S., Navarro, M., Moliner, B., Ferri, J., Noe, E., 2013. Efficacy of armeo® spring during the chronic phase of stroke. study in mild to moderate cases of hemiparesis. *Neurologia (English Edition)* 28 (5), 261-267.

Forman, G. (1986). Observations of young children solving problems with computers and robots. *Journal of Research in Childhood Education*, 1(2), 60-74.

Frank Lopresti, E., Mihailidis, A., Kirsch, N., 2004. Assistive technology for cognitive rehabilitation: State of the art. *Neuropsychological rehabilitation* 14 (1-2), 5-39.

Harwin, W. S., Ginige, A., & Jackson, R. D. (1988). A robot workstation for use in education of the physically handicapped. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 35(2), 127-131.

Hillman, M., 2004. 2 rehabilitation robotics from past to present-a historical perspective. En: *Advances in Rehabilitation Robotics*. Springer, pp. 25-44.

Hogan, N., Krebs, H. I., Chamnarong, J., Srikrishna, P., & Sharon, A. (1992, September). MIT-MANUS: a workstation for manual therapy and training. I. In *Robot and Human Communication, 1992. Proceedings., IEEE International Workshop on* (pp. 161-165). IEEE.

Kiresuk, T. J., & Sherman, R. E. (1968). Goal attainment scaling: A general method for evaluating comprehensive community mental health programs. *Community mental health journal*, 4(6), 443-453.

Kwee, H., Quaedackers, J., Van de Boel, E., Theeuwes, L., & Speth, L. (1999). POCUS project: adapting the control of the MANUS manipulator for persons with cerebral palsy. In *Proceedings of International Conference on Rehabilitation Robotics* (pp. 106-114).

Maciejasz, P., Eschweiler, J., Gerlach-Hahn, K., Jansen-Troy, A., Leonhardt, S., 2014. A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 11 (1), 3.

Sale, P., Lombardi, V., Franceschini, M., 2012. Hand robotics rehabilitation: feasibility and preliminary results of a robotic treatment in patients with hemiparesis. *Stroke research and treatment* 2012.

Seitz, R., Kammerzell, A., Samartz, M., Jander, S., Wojtecki, L., et al., 2014. Monitoring of visuomotor coordination in healthy subjects and patients with stroke and parkinson's disease: an application study using the pablo-device. *Int J Neurorehabil* 1, 113.

Tejima, N. (2001). Rehabilitation robotics: a review. *Advanced Robotics*, 14(7), 551-564.

WHO, 2016. World report on disability. WHO.

Wille, D., Eng, K., Holper, L., Chevrier, E., Hauser, Y., Kiper, D., Pyk, P., Schlegel, S., Meyer-Heim, A., 2009. Virtual reality-based paediatric interactive therapy system (pits) for improvement of arm and hand function in children with motor impairment? a pilot study. *Developmental Neurorehabilitation* 12 (1), 44-52.