

Un Framework para la Rehabilitación Física en Miembros Superiores con Realidad Virtual

Esmitt Ramírez¹, Francisco Moreno¹, Jordan Ojeda¹, Christiam Mena¹,
Omaira Rodríguez^{1,2}, Jeanlight Rangel³, Silvio Álvarez³

esmitt.ramirez@ciens.ucv.ve, morenof90@gmail.com, jrbworr@gmail.com, christiam.mena@gmail.com,
omaira.rodriguez@gmail.com, jeanlight.rangel2@gmail.com, slab_ve@hotmail.com

¹ Centro de Computación Gráfica, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela

² Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela

³ Servicio de Medicina Física y Rehabilitación, Hospital de Niños J.M. de Los Ríos. Caracas, Venezuela

Resumen: La rehabilitación física es una herramienta médica para el re-entrenamiento de personas afectadas por lesiones adquiridas o enfermedades que pueden afectar al sistema nervioso dando como consecuencia un mal funcionamiento del control motor voluntario. Recientemente, han surgido vertientes de gran impacto en términos de realidad virtual asociadas a la rehabilitación física de pacientes demostrando ser herramientas efectivas de ayuda terapéutica y diagnóstica. En muchas ocasiones, los resultados obtenidos con la realidad virtual superan a los obtenidos con metodologías tradicionales. En este trabajo se presenta un framework para la rehabilitación física para miembros superiores en pacientes entre 6 y 12 años de edad basado en realidad virtual. Nuestra propuesta se fundamenta en la creación de una arquitectura de hardware y software, donde se ejecutan un conjunto de videojuegos que inducen actividades físicas particulares, y a la provisión de cambios neuronales mediante el empleo de la acción/observación. Además, se procura la captura de la atención del paciente empleando contenido dinámico y entretenido de forma interactiva. El framework fue diseñado en conjunto con personal especializado que coordina la terapia de rehabilitación del Hospital de Niños J.M. de Los Ríos ubicado en Caracas, Venezuela.

Palabras Clave: Realidad Virtual; Terapia de Rehabilitación; Videojuegos; Activación Cerebral; Kinect.

Abstract: Physical rehabilitation is a medical tool for re-training of affected people caused by injuries or diseases that can affect the nervous system giving as result the malfunction of the voluntary motor control. Nowadays, there have been aspects of great impact in terms of virtual reality associated with physical rehabilitation of patients proving to be effective tools for diagnostic and therapeutic aid. In many cases, results obtained using virtual reality are better than those obtained with traditional methodologies. This paper presents a computational framework for physical rehabilitation for upper limbs in patients from 6 to 12 years old based on virtual reality. Our proposal is based on the creation of a hardware and software architecture, where a set of games that induce particular physical activities, and the provision of neuronal changes by using the scheme of action/observation. Also, we seek the complete attention of patients with the use of dynamic and entertaining content interactively. The framework was designed together with a specialized staff to coordinate the rehabilitation therapy at Hospital de Niños J.M. de Los Ríos (a children's hospital) located in Caracas, Venezuela.

Keywords: Virtual Reality; Rehabilitation Therapy; Video Games; Cerebral Activation; Kinect.

I. INTRODUCCIÓN

En el año 2011 la Organización Mundial de la Salud (OMS) estimó que más de 1.000 millones de personas en el mundo experimentan algún tipo de discapacidad [1]. En Latinoamérica más del 25% de la población con discapacidades son niños y adolescentes, y solo del 2% a 3% de esta población tiene acceso a los programas y servicios de rehabilitación [2].

Son muchas las formas de expresión, alcances y consecuencias

que acarrear las discapacidades. Así, una parte de la población afectada evidencia distintos tipos de déficit sensitivos, cognitivos y motores. Particularmente, relacionado con los déficit motores existen diversos tipos de discapacidad que afectan distintas partes del cuerpo con distintos grados de severidad.

La rehabilitación física es el conjunto de medidas sociales, educativas y profesionales que concierne a la evaluación, diagnóstico, prevención y tratamiento de la incapacidad en-



Figura 1: Fotografías del Ambiente Virtual Creado para la Rehabilitación Física en Miembros Superiores

caminados a facilitar, mantener o devolver el mayor grado de capacidad funcional e independencia posible.

El avance de las tecnologías ha permitido el desarrollo de procedimientos que permiten explorar la actividad cerebral durante las terapias de rehabilitación. Donde la actividad cerebral constituye un factor de vital importancia en la rehabilitación motora. Recientemente, con el fin de determinar las técnicas más efectivas y eficientes, una vertiente de estudios se ha orientado a tratar distintas metodologías de re-entrenamiento tomando en cuenta este aspecto.

Actualmente la realidad virtual es altamente empleada en rehabilitación, generando investigaciones y aplicaciones que contribuyen en esta rama de la medicina. La terapia basada en realidad virtual cuenta con un contexto funcional, concreto y estimulante para los pacientes, trayendo un beneficio directo tanto al paciente como al terapeuta por la adaptabilidad que tienen estos sistemas. Las tecnologías de punta son empleadas para la producción de ambientes simulados interactivos y multidimensionales. Los dispositivos visuales como monitores y lentes, dispositivos hápticos, hardware para el seguimiento corporal, etc. son introducidos para sumergir al paciente en un entorno virtual y dotarlo de la capacidad de modificarlo en función de metas a cumplir.

En la búsqueda de alternativas para la aplicación de realidad virtual en procura de mayores beneficios para pacientes tratados con estas tecnologías, se incorporan dispositivos que inicialmente han sido diseñados para otros fines pero que han mostrado ser funcionales en esta área, generando su adopción en estas terapias como el Xbox 360[®] Kinect[®], Wii[®], etc. Adicionalmente, su bajo costo en comparación con hardware especializado lo hace aún más atractivo.

En este trabajo se presenta un *framework* para el desarrollo de un sistema de realidad virtual no inmersiva con el fin de construir soluciones en el área de rehabilitación física empleando el hardware del Kinect[®]. Nuestra propuesta plantea el uso de una arquitectura para un sistema de bajo costo basado en videojuegos para la rehabilitación motora, enfocado en la activación y re-entrenamiento de miembros superiores, dirigido a niños entre 6 y 12 años de edad, ver Figura 1. En este trabajo, nos referiremos al término *pacientes* para indicar este rango de edad. Empleando el *framework* es posible aplicar, extender y ejecutar diversos videojuegos sobre un

sistema controlado por un especialista o terapeuta.

Adicionalmente, es importante destacar que esta investigación está enmarcada en un proyecto interdisciplinario en conjunto con el Hospital de Niños J.M. de Los Ríos de Caracas cuyos expertos en el área de Rehabilitación y Medicina Física ajustan los requerimientos del sistema para su uso clínico en los pacientes

En la Sección II se muestra una pequeña introducción a los conceptos asociados al uso de la realidad virtual en la rehabilitación. La Sección III presenta una revisión de los trabajos previos aplicados al tema de estudio. Luego, la Sección IV explica detalladamente la propuesta de este trabajo. En la Sección V, se muestra los aspectos del desarrollo de la plataforma de rehabilitación así como el empleo del *framework*. La Sección VI presenta una evaluación del sistema a nivel de software. Finalmente, en la Sección VII se muestra una discusión y conclusiones de los aspectos de nuestro trabajo.

II. LA REALIDAD VIRTUAL EN LA REHABILITACIÓN

El término realidad virtual (RV), fue popularizado en el año 1986 por Jaron Lanier, desde entonces, ha sufrido numerosas transformaciones, debido al constante avance de la tecnología. Actualmente se puede definir como una simulación del mundo real generada por un software y experimentada mediante una interfaz humano-computador.

La realidad virtual se clasifica de acuerdo al grado de inmersión que genera en el usuario. Según Burdea y Coiffet [3], el término inmersión es el acto voluntario de obviar los distintos estímulos que hace percibir la experiencia presentada como no real, permitiendo captar toda la atención y concentración del usuario involucrado. Así, resulta posible clasificar la RV en dos vertientes, inmersiva y no inmersiva. La primera envuelve la mayor cantidad de sentidos posibles del usuario (generalmente empleando hardware especializado). La segunda, no inmersiva, es más común (no requiere de hardware especializado) y se encuentra a menudo en los videojuegos.

En el área de la medicina y psicología, la RV ha sido ampliamente utilizada, dado que puede presentar situaciones desafiantes dentro de un ambiente seguro, manteniendo un control experimental sobre la medición y presentación de los estímulos [4]. Las primeras aplicaciones de este tipo dieron

lugar a una serie de intervenciones psicosociales para el tratamiento de fobias. Luego, se expandió a otras áreas como entrenamiento quirúrgico y rehabilitación motora, entre otras.

En la rehabilitación motora, la RV se emplea como una herramienta de rehabilitación y evaluación en programas de entrenamiento del equilibrio, la postura y la marcha, activación de las funciones en los miembros superiores, terapias de tolerancia al ejercicio y al dolor, evaluación de actividades de la vida diaria y evaluación de negligencias visuales posteriores a un accidente cerebro vascular (ACV) [5].

De acuerdo a Holden [6], en un proceso de rehabilitación motora exitoso se destacan tres aspectos fundamentales: repetición, motivación y retroalimentación. Para aprender a realizar un movimiento, este debe ser ejecutado repetidamente para la memorización y el aprendizaje motor, ya que estimula la reorganización neuronal. La motivación es un aspecto donde la terapia a través de RV suele destacarse, debido a la forma como se puede presentar un ejercicio, resultando agradable para el usuario. En un videojuego se plantean distintas metas a cumplir, las cuales dan una retroalimentación al usuario de estar realizando un movimiento de forma correcta o no. Si tales objetivos son planteados correctamente entonces representan un reto al usuario, generando una motivación para lograr el objetivo. Esto permite realizar las repeticiones necesarias para estimular la reorganización cerebral y así, memorizar el movimiento.

Los ejercicios terapéuticos propuestos usando RV suelen ser totalmente configurables y, en los ambientes virtuales (AV) generados se da especial atención a los puntos clave del ejercicio, eliminando los posibles agentes distractores que puedan degradar la calidad de la terapia. A continuación, se estudiarán algunos de los estudios realizados en esta dirección.

III. TRABAJOS PREVIOS

Los primeros trabajos de RV para rehabilitación terapéutica fueron bajo estudios con pacientes sanos, y posteriormente aplicados a pacientes con alguna discapacidad. Webster et al. [7] realizaron un experimento con pacientes afectados por ACV en sillas de ruedas y con el síndrome de negligencia. En su experimento, se llevaron a cabo pruebas empleando terapia tradicional y terapia de RV, observando menos errores en el recorrido de una trayectoria con obstáculos al usar RV.

En años recientes los AV han sido utilizados como estudios experimentales aportando buenos resultados. Merians et al. [8] plantean la posibilidad que los efectos de la plasticidad estimulados con terapias basadas en RV conducen a resultados positivos. Al mismo tiempo, sugieren que la rehabilitación virtual (término acuñado a este proceso) debe basarse en la comprensión de la potencialidad del sistema nervioso para generar una modificación en la disposición neuronal. En el 2005, You et al. [9] demuestran que la terapia con RV produce cambios en la corteza sensorial-motora del cerebro, las cuales se relacionan con la mejora de las habilidades motrices de las extremidades afectadas por enfermedades causantes de la discapacidad.

BioTrak[®] desarrollado por Bienetec [10], es una herramienta basada en tecnología RV que integra en una misma plataforma ejercicios para el entrenamiento y rehabilitación de determinadas funciones que se han visto reducidas o perdidas a causa de diversas patologías. Igualmente, el sistema RGS [11] consiste en una serie de soluciones para rehabilitación de miembros superiores que contiene ambientes diseñados a la medida para cada paciente de forma configurable.

En los últimos años, las investigaciones se enfocan en utilizar hardware existente no especializado de bajo costo con el fin de masificar su utilización y ser más accesible. Un ejemplo de lo constituye el uso de hardware diseñado para el entretenimiento, dentro de la rehabilitación (e.g. Kinect[®] y Wii[®]).

Un ejemplo enfocado en la rehabilitación motora empleando Kinect[®] se presenta en el proyecto Kinesthesia [12], en esta aplicación el Kinect[®] captura la posición del cuerpo basado en puntos claves o uniones (joints). En 2012, LaBelle [13] menciona que el uso del Kinect[®] en la rehabilitación física es un tema abierto a la investigación dentro del área de la rehabilitación con mucho potencial en las terapias.

Resulta entonces factible estudiar y desarrollar soluciones haciendo uso de la tecnología Kinect[®] en términos de rehabilitación motora para constatar su inclusión en terapias que permitan obtener un proceso de recuperación exitoso. En la siguiente sección, mostramos nuestra solución basada en una arquitectura para rehabilitación física de miembros superiores empleando realidad virtual no inmersiva.

IV. SOLUCIÓN PROPUESTA

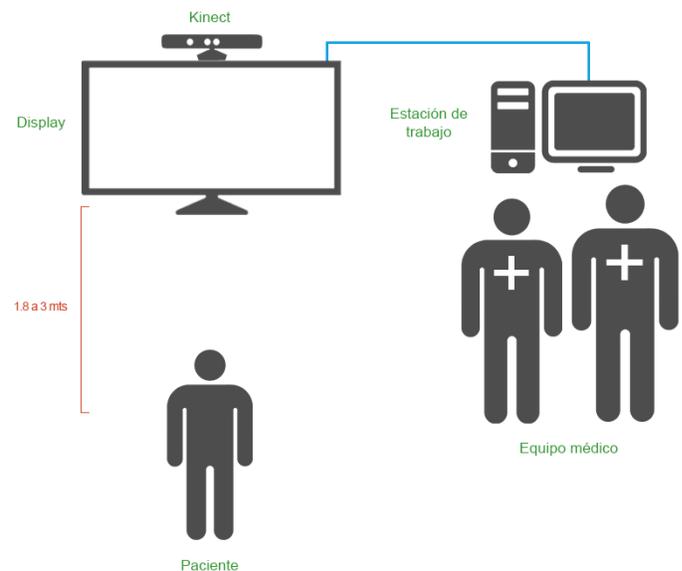


Figura 2: Arquitectura de Hardware Propuesta para nuestra Solución Terapéutica

Nuestra propuesta se basa en una arquitectura de hardware y software para la rehabilitación física de miembros superiores empleando realidad virtual que satisfaga un conjunto de requerimientos tales como, fácil de usar por el personal

médico, intuitivo y natural para el paciente, factible y seguro para el paciente, además de bajo costo y fácil de reproducir en instalaciones hospitalarias o el hogar. Nuestra propuesta ataca las actividades terapéuticas enfocadas en los miembros superiores.

La arquitectura de hardware propuesta consiste en una estación de trabajo con una PC convencional, un Kinect®, y un monitor LCD (display) tal como se muestra en la Figura 2.

El dispositivo Kinect®, detecta la posición del paciente, dotando al sistema de la capacidad de reconocimiento y reacción en función a la movilidad y gestos ejecutados por parte del mismo. El paciente se debe ubicar a una distancia de 1.8 m a 3 m del receptor Kinect®. Inicialmente el sistema realiza una calibración para determinar la posición y alcance de movimiento con los miembros superiores del paciente.

La arquitectura de software propuesta está conformada por dos componentes principales: uno dirigido al personal médico y, otro a los pacientes. El primero de estos se encarga de la gestión administrativa del sistema, incluyendo el control de pacientes, sesiones y parámetros de los videojuegos. El segundo, está dedicado al despliegue del contenido gráfico con el que interactúan los pacientes, mostrando la ejecución de cada uno de los videojuegos.

A. Componentes de la Arquitectura

El componente desarrollado para el personal médico se muestra como una interfaz simple, intuitiva y fácil de usar. Ésta permite navegar e iniciar cada una de las opciones que el sistema provee. En la Figura 3 se muestran la vista al usuario de los cuatro módulos que forman este componente.



Figura 3: Interfaz del Componente Desarrollado para el Personal Médico

El primero de ellos consiste en la **Gestión-Paciente**, donde se muestra las opciones asociadas a la gestión de pacientes en la base de datos del sistema, que consiste en añadir a un nuevo paciente para realizar una terapia con el sistema, eliminar e incluso actualizar los datos de un registro. El módulo de **Calibración** incluye las opciones relativas a la activación de los métodos de calibración para el Kinect® que consiste en determinar los rangos de alcance motor de un paciente.

Luego, el módulo de **Mi Perfil** permite dar inicio a la sesión de un paciente y visualizar las estadísticas asociadas a su

historial de rehabilitación durante un tiempo determinado. Por último, el módulo **Juegos** maneja la selección de videojuegos y parámetros como el tiempo y la dificultad, antes del inicio de cada uno.

Es importante destacar que el personal médico podrá controlar todos los aspectos de la aplicación desde la interfaz que el sistema expone. En tal sentido, el paciente siempre jugará bajo las especificaciones que el terapeuta plantee.

Por otro lado, el componente desarrollado para los pacientes está basado en una interfaz NUI (Natural User Interface) presentada para responder a los eventos que se les presente en las actividades. Empleando el Kinect®, es posible identificar la ubicación del paciente así como los miembros superiores e identificarlos en la pantalla de juego. En cada juego, el paciente podrá observar su silueta capturada por el Kinect® y procesada por el sistema, de forma tal de asociar sus movimientos con los movimientos realizados en el juego (ver ejemplo en la Figura 1).

B. Estructura del Framework

La estructura del *framework* desarrollado se representa en módulos funcionales los cuales se pueden observar en la Figura 4. A continuación se detalla cada uno de estos.

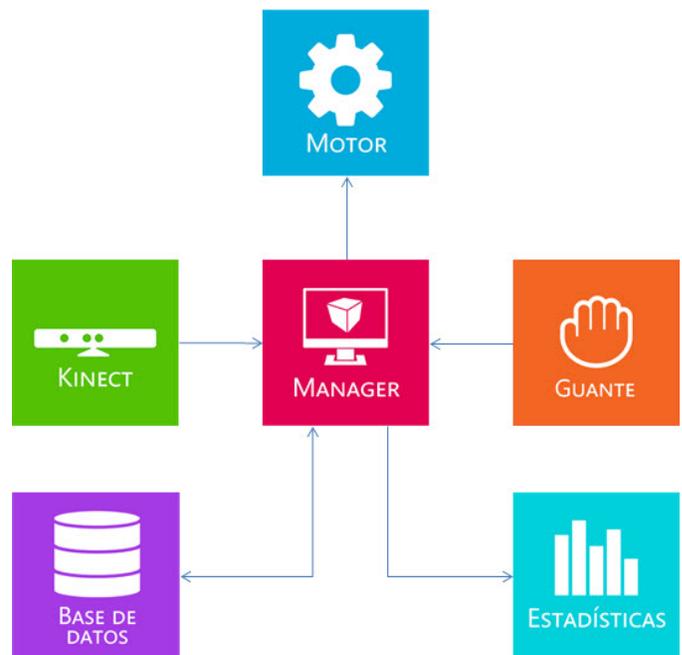


Figura 4: Representación de los Módulos que Conforman el Framework

1) **Controlador**: Este módulo constituye el núcleo del sistema, donde se encuentra las interfaces de programación definidas por el *framework*. Un videojuego se desarrolla bajo un API que permite la interacción y definición para todas sus funciones. Al mismo tiempo, el Controlador se encarga de la interacción de los otros módulos cada vez que sucede un evento que cambie entre los estados activo, pausado y cancelado.

2) *Motor*: El módulo de Motor agiliza y facilita la creación de los videojuegos o actividades terapéuticas al controlar los procedimientos necesarios para el despliegue gráfico. Así, es posible agrupar sus funcionalidades en: carga de modelos 3D y escenas complejas, gestor de animaciones y de iluminación.

La carga de modelos 3D realiza las operaciones requeridas para la lectura desde un archivo y el despliegue de un modelo 3D poligonal. Del mismo modo, la carga de escenas complejas, permite obtener el contenido general de una escena compleja formada por diversos modelos 3D. Particularmente, para nuestra propuesta se desarrolló un formato de escena basado en el uso de XML (Extensible Markup Language).

La carga de modelos y escenas solo toman en cuenta modelos estáticos, es decir, que no varían a través del tiempo. El gestor de animaciones permite realizar la carga de modelos con animación, permitiendo la presencia de dinamismo en las escenas sin la necesidad de haber interacción directa con el usuario. En nuestra propuesta, el formato de animación MD5 es empleado debido a su extenso uso en videojuegos.

Por último, el gestor de iluminación permite establecer y calcular las interacciones entre las fuentes de luz presentes en la escena, y los modelos y escenario. Para ello, existen diversos tipos de iluminación posibles: direccional, puntual, spot, y basada en la técnica Deferred lighting.

Esta última técnica de iluminación se realiza en dos pasadas, calculando la interacción lumínica en una escena. En una primera pasada se almacenan en *buffers* algunos datos de la escena como información de posición de los vértices, vectores normales, e incluso datos relativos a materiales de la escena desde el punto de vista de la cámara. Gracias al uso del hardware gráfico actual, es posible almacenar los *buffers* empleando texturas que residen en memoria de la tarjeta gráfica. En la segunda pasada, empleando la información de los diversos *buffers* se calcula de la forma en que cada píxel (en espacio de pantalla) resulta afectado por la luz directa o indirecta.

La Figura 5 muestra un ejemplo de la composición de los diversos *buffers* para obtener el resultado de la técnica e iluminación Deferred lighting.

Todas las técnicas de iluminación antes mencionadas son aplicadas con el objetivo de obtener un escenario 3D realista y recrear un ambiente confortable para los pacientes.

3) *Guante*: Nuestro *framework* está diseñado para el uso de actividades (videojuegos) empleando un guante virtual de datos para la captura del movimiento de los dedos y muñeca para el tratamiento de la motricidad fina.

El guante desarrollado por Ojeda et al. [14] se considera para ser integrado de forma funcional y sencilla a nuestra propuesta dado su simple interfaz de comunicación. Así, este módulo realiza la captura y tratamiento de imágenes desde una cámara web, a fin de detectar los datos necesarios para la interpretación de la movilidad de la mano.

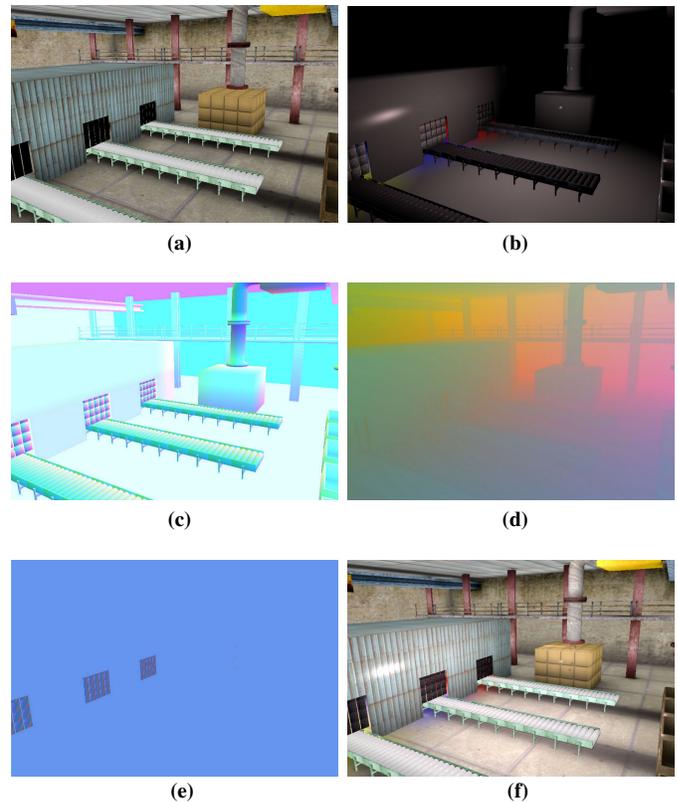


Figura 5: Técnica de Iluminación Deferred Lighting, donde se Muestran los *Buffers* de a) Valores Albedo, b) Mapa de Luces, c) Vectores Normales, d) Posición de los Vértices, e) Valores de Transparencia, y f) la Composición Final

El módulo extrae en tiempo real las imágenes desde una cámara web incorporada al guante para procesarlas empleando algoritmos de búsqueda basados en patrones cromáticos. Para ello se establecen de forma previa valores determinantes para esta operación como las dimensiones de la imagen a capturar, el color a rastrear dentro de cada imagen, y el tamaño mínimo de las áreas para ser consideradas como un patrón.

Una vez determinados los patrones cromáticos se extrae el valor de posición relativa de cada patrón en función a las dimensiones de la imagen, determinando el grado de flexión/extensión de cada dedo. Posteriormente, se hace correspondencia con cada uno de los dedos de la mano ejercitada (de izquierda a derecha en caso de emplearse la mano derecha, de derecha a izquierda en caso contrario). Finalmente, se reportan los valores de flexión/extensión detectados.

4) *Kinect*[®]: Este hardware de bajo costo se emplea como medio de captura de movimientos de gran extensión, procurando la ejercitación de la motricidad gruesa. Con este dispositivo se aprovecha la versatilidad de la realidad virtual no inmersiva en cuanto a la capacidad de aumentar la retroalimentación de acción-observación y así promover la activación cerebral a partir de las neuronas espejo.

Nuestra solución dispone de un conjunto de videojuegos desarrollados exclusivamente para el ejercicio de terapias de re-

habilitación, garantizando la especificidad de la ejercitación, la repetición y el entrenamiento cognitivo viso-espacial, aspectos que resultan fundamentales en métodos de re-entrenamiento.

Igualmente, se implementan metodologías de calibración de hardware a fin de ajustar el funcionamiento de los videojuegos del sistema a las capacidades específicas de cada paciente, permitiendo que la dinámica de la rehabilitación se ajuste a los rangos alcanzables de movilidad de cada paciente. Así, se despliegan gráficas analíticas con las cuales resulta posible establecer un seguimiento relativo a la evolución del paciente con respecto a la terapia. Además durante la ejecución de cada juego, se muestran gráficos que permiten al médico tratante evaluar el comportamiento del paciente.

5) *Estadísticas*: Para evaluar el estado y evolución del paciente en el transcurso del tiempo, se cuenta con un conjunto de metodologías que permite la generación automática de gráficos estadísticos: general, tiempo real e histórico.

Los gráficos generales constituyen estadísticas acumulativas con las que es posible evaluar el estado actual del paciente tomando en cuenta su actuación en el sistema. Los de tiempo real resultan de evaluaciones de la movilidad cuando realiza una sesión de rehabilitación empleando algunos de los videojuegos. Este tipo de gráficos se visualizan en tiempo de ejecución del videojuego. Por último, el histórico muestra de la actuación del paciente en cada sesión, permitiendo la evaluación de la evolución del mismo.

6) *Base de Datos*: El módulo manejador de base de datos es el encargado de gestionar todas las operaciones que requieren el acceso a la base de datos del sistema. Permite el registro, inicio de sesión y obtención de datos de un paciente previamente registrado, actualización y eliminación de un paciente. En nuestra propuesta, se emplea el manejador SQLite (<http://www.sqlite.org>).

V. PLATAFORMA DE REHABILITACIÓN

El *framework* desarrollado sobre nuestra propuesta de plataforma de rehabilitación ha sido implementado empleando el sistema operativo Windows 8, con el lenguaje de programación C#, el lenguaje de shading HLSL (High-Level Shader Language) y el IDE para desarrollo Microsoft Visual Studio 2012. Además se emplea el framework XNA en su versión 4.5. Adicionalmente se emplea un conjunto de herramientas de software como librerías y programas con los que se agilizan partes del desarrollo.

La población a la cual está dirigida nuestra plataforma son niños entre 6 y 12 años, debido al pensamiento lógico concreto alcanzado a dicha edad [15]. Debido a la variedad de patologías que acuden al Servicio de Rehabilitación Física del Hospital de Niños J.M. de Los Ríos se consideró clasificarlas en lesiones físicas-cognitivas y neurológicas. Se consideran pacientes que presentan limitaciones en amplitud articular, fuerza muscular, coordinación, déficit de atención, alteraciones sensorio-perceptuales y cognitivas.

A continuación se presenta cada una de las actividades

terapéuticas virtuales o videojuegos desarrollados en este trabajo.

A. Actividad Terapéutica La Fábrica

Este videojuego es el más complejo de los tres propuestos, mide, y estimula un mayor número de variables cognitivas. El videojuego se desarrolla en una fábrica, que dispone de tres bandas transportadoras. Cada banda transportadora está constituida por un conjunto de cilindros cuyas rotaciones genera una dinámica de transporte para los objetos sobre ésta.

Los objetos se deslizan sobre las bandas transportadoras, inicialmente situados en el extremo opuesto donde se encuentra el paciente con respecto a las bandas. Cada uno de estos objetos está asociado con uno de los seis modelos gráficos disponibles para el videojuego.

En el extremo cercano al jugador se dispone un conjunto de cajas que cumplen el papel de contenedores. El jugador tiene como objetivo recoger los objetos que se encuentran en las bandas transportadoras y ubicarlos en los contenedores. Los aciertos calificarán para la puntuación final. Cada contenedor, está identificado con el tipo de objeto que debe ser almacenado en él, información que debe tomar en cuenta el usuario antes de ubicar un objeto en los mismos. En la Figura 6 se puede apreciar la disposición de los elementos antes mencionados.



Figura 6: Captura de una vista del Videojuego La Fábrica dentro de nuestra Solución

Con La Fábrica se espera incrementar la capacidad de movimiento a lo largo y ancho del plano transversal, rompiendo un posible patrón de rigidez (o falta de fuerza) generado por atrofia del tono muscular. También se busca el movimiento de los miembros superiores actuando en contra de la gravedad. El videojuego proporciona al paciente una resistencia donde se pueden mejorar amplitudes, fuerza muscular y coordinación. Se determinó que el videojuego tiene un papel fundamental en el nivel cognitivo y perceptivo del jugador, donde el esquema corporal es necesario para poder precisar los movimientos que debe realizar con sus miembros superiores.

Este videojuego requiere de cuatro pasos para el cumplimiento de los objetivos generados. Específicamente la acción de recoger un objeto y colocarlo en el contenedor esperado es

generada mediante cuatro movimientos claves. La posición inicial del paciente consiste en permanecer en una posición bípeda con su miembro superior, derecho o izquierdo, en flexión de hombro horizontal y el otro miembro en flexión de hombro vertical.

Asumiendo que el brazo seleccionado (antes del inicio de la actividad) ha sido el brazo derecho, el jugador deberá:

- 1) Guiar la máquina de extracción hasta colocarla sobre un objeto que esté sobre alguna de las bandas transportadoras. Mover el brazo derecho paralelamente al plano transversal para colocar la máquina de extracción (cuya posición responderá a la posición del brazo) sobre la banda transportadora, procurando que existan objetos para ser extraídos. Así, se ejercita el hombro realizando movimientos de aducción y abducción horizontal.
- 2) Extraer el objeto de la cinta, levantando el brazo izquierdo con la finalidad de activar la máquina. Mantener el brazo izquierdo en esta postura hasta que el objeto sea capturado. Una vez el objeto es capturado, se proceder a relajar el brazo. Con este paso, se debe ejercer la extensión de hombros.
- 3) Colocar la máquina de extracción sobre el contenedor correspondiente. Una vez extraído el objeto, colocar la máquina sobre el contenedor correspondiente. Ejercitando nuevamente el hombro a partir de movimientos de aducción y abducción horizontal.
- 4) Dejar caer el objeto en el contenedor al estar la máquina colocada sobre el contenedor correspondiente al objeto capturado, y mantener el brazo extendido con una flexión de hombro de cero grados. Luego ejercer un movimiento de flexión de codo y posterior a éste regresar al estado inicial.

B. Actividad Terapéutica GALAXY

La temática del videojuego GALAXY sitúa al jugador en una nave espacial que está siendo embestida por un conjunto de asteroides. En la Figura 7 se pueden apreciar todos los elementos que componen el videojuego.



Figura 7: Captura de un Instante del Videojuego GALAXY en su Ejecución

Se asume que la nave ha perdido una de sus partes debido al impacto de un asteroide. El jugador tiene la misión de evitar que nuevos asteroides ingresen a la nave re-dirigiéndolos fuera

de ella. A medida que los asteroides impactan la nave, trozos de éstos podrían entrar en ella. El jugador deberá usar sus manos, para guiarlos fuera de la misma.

Además de cumplir la tarea de expulsar los asteroides que tiene una puntuación en el juego, el jugador tiene la oportunidad de mejorar su desempeño impactando nuevos objetivos en forma de dianas que aparecerán periódicamente en escena. En esta actividad terapéutica se trabajan ambos brazos al mismo tiempo, ejercitando la motricidad gruesa, así como la coordinación al lograr alcanzar el asteroide y redirigirlo en la dirección deseada. El paciente deberá extender ambos brazos en paralelo al plano transversal y frontal, en su máxima capacidad posible, para poder abarcar todas las áreas en las que los asteroides pueden aparecer. Logrando el paciente realizar ejercicios de extensión y coordinación viso-espacial. Debido a que el paciente tendrá la necesidad de realizar movimientos rápidos para alcanzar a golpear todos los asteroides en la escena, se desea que el mismo realice ejercicios de fuerza durante el transcurso de la actividad.

En GALAXY se hace especial énfasis en ejercitar el movimiento del brazo a lo largo del plano sagital (flexión-extensión del codo), ya que el paciente obtendrá un mayor puntaje dependiendo de la fuerza con la que golpee el asteroide, la cual es determinada por la velocidad con la que el jugador pueda extender el brazo en el eje Z hasta la máxima extensión registrada en el calibrador. No existen gestos predefinidos para jugar, el jugador puede mover sus manos libremente para alcanzar los objetivos.

El videojuego está diseñado para ejercitar la flexión-extensión del codo mediante el movimiento que debe realizar el paciente para poder aplicar fuerza a los asteroides, los movimientos que implican alcanzar los asteroides para impactarlos ejercitan la amplitud articular del brazo.

Debido a su característica de no poseer limitantes en los movimientos y el desplazamiento libre, el videojuego está indicado para ser utilizado en pacientes con cualquier tipo de patología que involucre problemas motores dentro de la terapia de rehabilitación.

Como el paciente debe tener la capacidad de coordinar sus movimientos con las acciones que ocurren en la escena y requiere de un cierto grado de concentración, el juego sirve a su vez como un instrumento para tratar a pacientes con desordenes de atención y autismo. Se logra un movimiento bilateral en los miembros superiores, fortalecimiento de la fuerza muscular por la posición que se debe mantener para la ejecución del juego donde actúan en contra de la gravedad.

El videojuego proporciona al paciente una movilidad en sus miembros superiores, motricidad gruesa por el desplazamiento mientras ejecuta el juego. Logrando que realice una integración bilateral inhibiendo patrones posturales inadecuados y facilitando la funcionalidad de ambos miembros.

Este juego proporciona un nivel de atención y concentración para mejorar la capacidad cognitiva del paciente.

C. Actividad Terapéutica ACIS

La temática de este videojuego se desarrolla en un ambiente acuático con elementos tales como, peces y un pescador. El jugador debe capturar con una caña de pescar los peces que viajan de un lado a otro en la escena. En ACIS, la cámara de visualización 3D se dispone en una posición tal que, en compañía a los elementos que conforman la escena, simula estar bajo el agua. Un ejemplo de ello se muestra en la Figura 8.



Figura 8: Instante dentro del Videojuego ACIS Ejecutado por un Jugador

Los distintos peces son representados con modelos gráficos. Para ello, se define una estructura de datos genérica para la representación de un pez que tiene asociado un comportamiento y una representación gráfica, única para cada tipo de pez. Igualmente, la estructura almacena el peso del pez.

El jugador controla un anzuelo que es el elemento con cual podrá capturar los peces. Éste está centrado en la escena y se desplaza sobre el eje de ordenadas. La captura de un pez es valuada con una puntuación que varía según el peso del mismo, el cual será percibido por el jugador por el tiempo que tarda en sacar virtualmente el pez del agua.

Con este juego se busca ejercitar el hombro a partir de la flexión y extensión del mismo. Se desea motivar al paciente a realizar tal movimiento en su máxima extensión, alentándolo incluso a que supere sus límites de movilidad (que fueron calibrados previamente en la etapa de calibración del Kinect®).

La interacción del jugador con ACIS está conformada en dos fases. La primera consiste en posicionar el anzuelo en la trayectoria del pez, esto se logra con movimientos sobre el eje de ordenadas. En la segunda fase el jugador debe sacar el pez del agua, para ello deberá ejercer una flexión de hombro prolongada hasta lograr el objetivo, el tiempo de esta flexión dependerá del peso virtual del pez.

Este videojuego sólo involucra un tipo de movimiento físico para el paciente, procurando de esta manera disminuir la carga cognitiva. De esta forma, resulta un videojuego simple y efectivo desde el punto de vista terapéutico.

VI. EVALUACIÓN DEL SISTEMA

Durante la evaluación de un sistema computacional, se realizan diversas pruebas para comprobar su efectividad. Una de las

pruebas consiste en la evaluación del diseño de la interfaz de usuario. Para ello, Nielsen [16] propone una serie de heurísticas tales como:

- A Visibilidad del estado del sistema
- B Utilización del lenguaje de usuario
- C Control y libertad para el usuario
- D Consistencia y estándares
- E Prevención de errores
- F Minimización de la carga cognitiva
- G Flexibilidad y eficiencia de uso
- H Presencia de diálogos estéticos y diseño minimalista
- I Ayuda a los usuarios en el reconocimiento, diagnóstico y recuperación ante errores
- J Ayuda y documentación

Con el objetivo de demostrar la capacidad de nuestra solución, se aplicaron estas heurísticas en forma de encuesta. En dicha encuesta se pregunta a un total de 5 personas, cada uno de los tópicos (de la A-J) presentados de forma explicativa, donde la respuesta posible es SI o NO. La Figura 9 muestra los resultados luego de aplicar las encuestas.

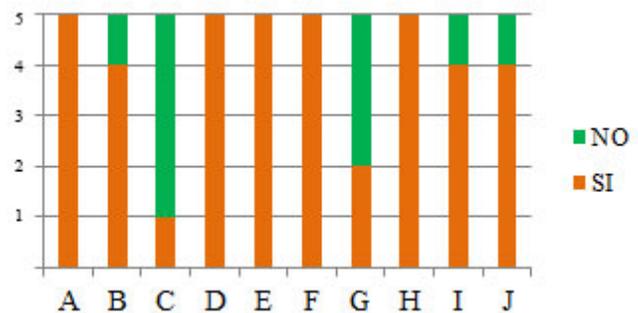


Figura 9: Resultado de la Encuesta Aplicada sobre la Heurística de Nielsen

Los datos obtenidos reflejan la alta conformidad de los usuarios con el sistema. El punto C es de carácter restrictivo con respecto al libre manejo de parte del usuario por estar en un ambiente supervisado. El comportamiento del punto G es debido a la necesidad de la prosecución de los procesos en el sistema. Cabe destacar que el sistema se encuentra en mejoramiento continuo.

VII. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una arquitectura robusta para la rehabilitación física en miembros superiores empleando realidad virtual. Para ello, se presenta una estructura de hardware y software soportado en el desarrollo de un *framework* extensible y simple que maneja la creación de diversos videojuegos dentro de nuestra arquitectura.

Así, se presenta un sistema de realidad virtual de bajo costo para uso clínico, en pacientes entre 6 y 12 años con discapacidades en miembros superiores, del sistema hospitalario nacional. Siendo una solución reutilizable para miembros inferiores u otras discapacidades de patologías particulares. Al mismo tiempo, el uso del sistema no representa ningún riesgo para el paciente que se somete a éste.

El sistema utiliza una plataforma de hardware sencilla y de fácil construcción, haciéndolo escalable, reutilizable y robusto. Es importante destacar que el sistema no requiere de entrenamientos especiales o costosos por parte del personal médico, siendo controlado en todo momento por estos pudiendo intervenir en cualquier momento de su ejecución.

Se realizaron sesiones de prueba con personal médico especializado teniendo una gran aceptación por parte del mismo. Sin embargo, se observó el cansancio del jugador al permanecer de pie por un largo tiempo. Actualmente, se tiene proyectado el uso de nuestra solución en pacientes con discapacidad móvil (leve o severa) en sus miembros inferiores. Sin embargo, se han realizado pruebas con usuarios sentados.

El trabajo aquí presentado constituye la primera fase de un proyecto interdisciplinario desarrollado para el Hospital de Niños J.M. de Los Ríos en Caracas, Venezuela. Como segunda fase está la implantación del sistema en las instalaciones del hospital e incorporar videojuegos que incluyan la motricidad fina con un guante de datos. En una tercera fase se proyecta evaluación del sistema en pacientes y estudiar su progreso terapéutico en el tiempo con el uso del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Al personal del Servicio de Medicina Física y Rehabilitación del Hospital de Niños J.M. de Los Ríos. A los niños y niñas, pacientes y sus padres por habernos permitido obtener información valiosa para la realización de este trabajo. Igualmente, a Daniellys Bolívar de 6 años quien ha jugado repetidas veces los videojuegos presentados en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Organización Mundial de la Salud y Banco Mundial, *Informe Mundial sobre la Discapacidad*, Ediciones de la OMS, 2011. <http://tinyurl.com/bt4xes9>

- [2] M. Zepeda y A. Vásquez, *Aplicación de la Clasificación Internacional del Funcionamiento, de la Discapacidad y de la Salud en Estudios de Prevalencia de Discapacidad en las Américas*, Organización Panamericana de la Salud, 2012.
- [3] G. Burdea y P. Coiffet, *Tecnologías de la Realidad Virtual*, Barcelona, España: Paidós, 1996.
- [4] H. Sveistrup, *Motor Rehabilitation using Virtual Reality*, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, vol. 1, no. 1, pp. 10, 2004.
- [5] J. Broeren, H. Samuelsson, K. Stibrant-Sunnerhagen, C. Blomstrand y M. Rydmark, *Neglect Assessment as an Application of Virtual Reality*, Acta Neurologica Scandinavica, vol. 16, no. 3, pp. 157-163, Septiembre 2007.
- [6] M. Holden, *Virtual Environments for Motor Rehabilitation: Review*, CyberPsychology & Behavior, vol. 8, no. 3, pp. 187-211, 2005.
- [7] J. Webster, P. McFarland, L. Rapport, B. Morrill, L. Roades y P. Abadee, *Computer-Assisted Training for Improving Wheelchair Mobility in Unilateral Neglect Patients*, Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, vol. 82, no. 6, pp. 769-775, Junio 2001.
- [8] A. Merians, H. Poizner, R. Bolan, G. Burdea y S. Adamovich, *Sensorimotor Training in a Virtual Reality Environment: Does it Improve Functional Recovery Poststroke?*, Neurorehabilitation and Neural Repair, vol. 20, no. 2, pp. 252-267, Junio 2006.
- [9] S. You, S. Jang, Y.-H. Kim, Y.-H. Kwon, I. Barrow y M. Hallettm, *Cortical Reorganization Induced by Virtual Reality Therapy in a Child with Hemiparetic Cerebral Palsy*, Developmental Medicine & Child Neurology, vol. 47, no. 1, pp. 628-635, 2005.
- [10] Bienetec, *Biotrak*, <http://www.biotraksuite.com>
- [11] Universitat Pompeu Fabra, *Rehabilitation Gaming System*, España. <http://rgs-project.eu>
- [12] C. Norman, D. Clark y C. Barnaby, *Kinesthesia*, National Instruments. <http://tinyurl.com/7f67ts6>
- [13] K. LaBelle, *Evaluation of Kinect Joint Tracking for Clinical and In-Home Stroke Rehabilitation Tools*, Notre Dame Thesis, 2011.
- [14] J. Ojeda, E. Ramírez, C. Mena y O. Rodríguez, *A Low-Cost Data Glove for Virtual Reality* in proceedings of the XII International Congress of Numerical Methods in Engineering and Applied Sciences (CIMENICS), pp. 19-24, 2014.
- [15] H. Ginsburg y S. Opper, *Piaget's Theory of Intellectual Development*, Prentice Hall, 1979.
- [16] J. Nielsen, *Enhancing the Explanatory Power of Usability Heuristics*, in proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 152-158, 1994.