



Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año

1. Datos generales del Proyecto

Código del proyecto: CI 2909			
Título del proyecto: Plataforma de realidad virtual para soportar el proceso de rehabilitación de la marcha humana			
Facultad o Instituto Académico: Facultad de Ingeniería			
Departamento o Escuela: Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica			
Grupo (s) de investigación: Grupo de Investigación en Control Industrial, Grupo de Investigación en Percepción y Sistemas Inteligentes, Sinergia.			
Entidades: Universidad del Valle			
Palabras claves: realidad virtual, marcha humana, rehabilitación			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado (h/semana)	Tiempo dedicado (h/semana)
Investigador Principal	Esteban Emilio Rosero García	8	8
Coinvestigadores	Eval Bladimir Bacca Cortés	4	4
	Gloria Patricia Arango Hoyos	4	4
	José Tomás Buitrago Molina	4	4
Otros participantes			

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

Estudiante de doctorado	Sergey González	40	40
Estudiantes de maestrías	Mario Lagos	40	40
Estudiantes de pregrado	Elkin Mauricio Echeverry	20	20
	Daniela Ortiz	20	20
	Juan Sebastian Sanclemente	20	20
	Sebastian Campos	20	20

2. Resumen ejecutivo:

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud se estima que el 15% de la población mundial son personas con discapacidad; en Colombia según el Censo DANE 2005, cerca del 2% de la población presentaba limitaciones para moverse o caminar, población en aumento debido a accidentes de tránsito y la violencia con armas de fuego existente; también se debe reconocer la importancia de atender la población discapacitada que deja el conflicto armado y así lograr una postura incluyente para esta población atendiendo uno de los desafíos en el proceso de post acuerdo. La marcha humana se puede afectar por accidentes cerebrovasculares, patologías neurológicas, distrofias musculares, lesiones en la médula espinal o el debilitamiento por el envejecimiento. Esto disminuye drásticamente la calidad de vida del afectado al reducir su capacidad de locomoción y su independencia y tiene implicaciones económicas debido a los largos periodos de recuperación. La rehabilitación de la marcha mediante la terapia convencional, presenta limitaciones para garantizar una práctica consistente de la actividad; las múltiples repeticiones se vuelven tediosas para el paciente, perdiendo interés y consistencia en su ejecución. También por la medición subjetiva de la condición del paciente y sus logros, lo que no permite dar una conclusión precisa de la evolución en el tratamiento. El análisis de la marcha humana estudia el proceso cinemático que ocurre al caminar. Conocerlo en detalle facilita el diagnóstico, tratamiento, seguimiento e implementación de métodos de rehabilitación en patologías asociadas con el movimiento. El análisis se basa en la descripción y en la cuantificación de la variación de los desplazamientos

del centro de masa del cuerpo y los centros de giro de las articulaciones, información que permite obtener los diferentes parámetros de la marcha. Los sistemas tradicionales para la medición de los parámetros de la marcha se basan en métodos heurísticos o en tecnologías robustas pero muy costosas. En este proyecto se desarrolló una plataforma de realidad virtual para soportar el proceso de rehabilitación de la marcha humana. La plataforma consta de un sistema de instrumentación que utiliza sensores portables de bajo costo y comunicación inalámbrica para la adquisición en línea de los parámetros de la marcha; la instrumentación alimenta a un sistema de gestión del proceso de rehabilitación, que le permite al fisioterapeuta medir la efectividad y el desempeño de la intervención y se integra el análisis de la marcha a un ambiente de realidad virtual en el que se anima un avatar quien duplica los movimientos del paciente; esto abre un universo de aplicaciones, donde el ambiente virtual de un lado provee de biofeedback al paciente y de otro, convierte la terapia en una actividad lúdica retadora y motivadora para su proceso de rehabilitación. Las soluciones tecnológicas obtenidas y el conocimiento interdisciplinar generado, sin duda aportan en la mejora de los procesos de rehabilitación de la marcha, para prestar servicios más accesibles y oportunos, con los que se mejora la calidad de vida de la población con limitaciones de movilidad en el país.

Palabras clave: Marcha humana, realidad virtual, rehabilitación, sensado inercial.

Keywords: human gait, virtual reality, rehabilitation, inertial sensors.

3. Síntesis del proyecto:

Objetivo general:

Desarrollar una plataforma de realidad virtual para soportar el proceso de rehabilitación de la marcha humana.

Objetivos Específicos:

1. Obtener el estado del arte sobre plataformas de realidad virtual para la rehabilitación de la marcha humana.

Con la revisión del estado de la información sobre realidad virtual en la rehabilitación de la marcha, se pudieron identificar tres parámetros principales. Los parámetros de interés en la documentación se pueden clasificar en 3 grupos: patrón de marcha, altura de paso y longitud de paso, y esfuerzo motor. En la tabla 1.1, se presenta la cantidad de trabajos correspondientes a cada parámetro en relación con el total de los artículos revisados. A continuación se presenta una breve descripción de cada grupo.

1.1 Patrón de marcha

La retroalimentación en estos casos consiste en presentar trayectorias terapéuticamente deseadas para que el paciente pueda adaptarse a ellas. En (Biswas, Mazumder, and Kundu 2012) con la combinación de datos de la cinemática de la marcha obtenidos de señales (EMG), se logra animar un avatar que imita los movimientos del paciente, logrando proporcionar un biofeedback. Con lo que según (Biswas, Mazumder, and Kundu 2012), este tipo de sistemas puede ser ampliamente aplicado en la rehabilitación de la marcha de pacientes con parálisis cerebral, pacientes post-traumatología y otros tipos de patologías de la marcha.

Tabla 1.1. Clasificación de los artículos según el parámetro de la marcha que abordan, y su frecuencia por cada parámetro en esta revisión.

PARÁMETRO DE REHABILITACIÓN	ARTÍCULO, AUTOR - AÑO	CANTIDAD
PATRÓN DE MARCHA	(Biswas et al., 2012)	3
	(Biffi et al., 2015)	
	(Rudinskiy et al. 2014)	
ESFUERZO MOTOR	(Bergman et al. 2011)	2
	(Götz et al., 2011)	
ALTURA AL PIE Y LONGITUD DE PASO	(Shema et al., 2013)	3
	(Fung & Perez, 2011)	
	(Peruzzi et al., 2016)	
OTROS PARÁMETROS	(Angus and Mel 2011)	4
	(Alahmari et al. 2014)	
	(Gottshall, Sessoms, and Bartlett 2012)	
	(Casanova et al. 2015)	
TOTAL ARTÍCULOS		12

1.2 Esfuerzo motor

El grado de discapacidad puede llegar a ser tan alto que se ha perdido completamente, o gran parte de la movilidad de las articulaciones, como sucede en los accidentes cerebrovasculares. En estos casos es muy útil usar mecanismos como exoesqueletos. La realidad virtual entra a jugar un papel crucial para apoyar los procesos de rehabilitación asistidos por robots, con el objetivo de involucrar a los pacientes en terapia y controlar su participación (Bergmann and Krewer 2011).

El entorno de juego Gabarello presentado en (Götz et al. 2011) integra los objetivos terapéuticos de la neurología clínica, con desafíos motivadores propios del diseño del juego para la rehabilitación de la marcha asistida por robots. El software aprovecha estas mediciones entregadas por el exoesqueleto, y las traduce en parámetros de juego, de tal manera que entre más fuerza ejerza el paciente, mayor es la velocidad del avatar.

1.3 Altura de paso y longitud de paso

La condición de adulto mayor muestra algunas dificultades en la marcha humana, la poca altura con que esta población levanta el pie al caminar, puede ocasionar tropiezos que son muy comunes. En (Shema et al. 2013), la captura del movimiento anima un entorno virtual, en el que se presentan caminos con obstáculos en medio de paisajes naturales como se muestra en la figura 2.5. Aquí se incluyen esfuerzos desafiantes como giros y caminar sobre un puente para cruzar un río, dichos obstáculos se presentan en dos planos de tal manera que el paciente pueda incrementar el paso y su longitud de paso en la acción de evitar tropezar con estos objetos virtuales

2. Definir los requerimientos y las especificaciones de desempeño de la herramienta de realidad virtual para soportar la rehabilitación de la marcha humana.

Como fuentes de información para el descubrimiento de los requerimientos se incluyen los participantes del sistema y la revisión de especificaciones de desarrollos similares. Los profesionales de fisioterapia vinculados al proyecto de investigación, son los principales

participantes del sistema, mientras que la revisión del estado de la información representa una fuente de recolección que permite el complemento para el análisis de requerimientos.

2.1 Requerimientos de usuario

Las preguntas preestablecidas para la entrevista con los participantes, se originan de la revisión del estado de la información. Las preguntas base, formuladas para la entrevista con los fisioterapeutas fueron: ¿qué servicios desea que el sistema le pueda ofrecer, de tal manera que puedan suplir las dificultades que se presentan durante los entrenamientos de la marcha humana?, ¿considera que la herramienta se debe enfocar en el entrenamiento de ciertos parámetros espacio-temporales de la marcha humana, o bien, considera que es mejor que el paciente se adapte a un patrón de marcha predefinido que agrupe todos estos parámetros?, ¿de qué manera considera que el paciente debe navegar e interactuar con los entornos virtuales que la herramienta le va a presentar?, ¿qué tipo de características, del entrenamiento lúdico, considera que sean las que establezcan los niveles de dificultad del juego?, ¿qué otro tipo de funcionalidad requiere sobre la interfaz gráfica de usuario, además de la configuración de la terapia con realidad virtual?.

2.2 Requerimientos del sistema y especificaciones de desempeño

Con los resultados de la entrevista, se procede a realizar un mayor desglose y detalle de las necesidades del usuario para generar el listado de los requerimientos del sistema. Estos requerimientos y especificaciones de desempeño se documentan como una clasificación (ver anexo A), que los relaciona, de tal manera que se puedan organizar en grupos coherentes. Los requerimientos se clasificaron en los siguientes grupos:

Navegación en el mundo virtual. Como consideraciones principales, aquí se determina que la navegación del paciente con el mundo virtual debe ser a manera de tercera persona (avatar) y la velocidad instantánea de la caminadora debe estar sincronizada con la velocidad con la que el paciente avanza en el mundo virtual.

Interacción con el mundo virtual. Necesidades relacionadas con la manera en la que deben reaccionar los objetos pertenecientes a los entornos virtuales cuando el personaje interactúa con ellos.

Ambientes interactivos. Se determina que los ambientes virtuales deben permitir entrenar tres parámetros espacio-temporales: altura de paso, amplitud de paso y longitud de paso.

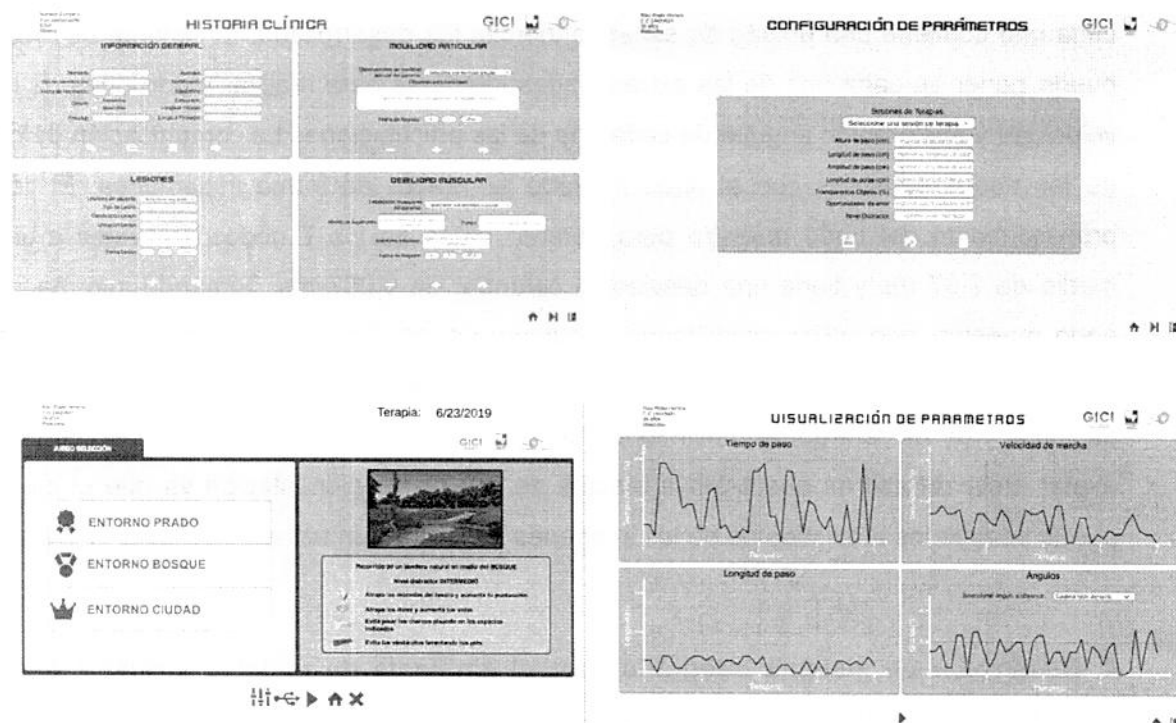
Niveles de dificultad. Se determina, disponer de una configuración del objetivo a alcanzar para entrenamiento de cada parámetro. Se definen tres niveles de dificultad pero que van relacionados con el nivel de estímulos distractores para el paciente.

3. Desarrollar un sistema de medición electrónica de las variables de interés para la marcha humana.

Un sistema de medición inalámbrico basado en siete nodos sensores y un nodo maestro, donde cada uno contiene una unidad de sensado inercial fue desarrollado. El sistema de medición se puede poner en cada una de las extremidades inferiores para realizar mediciones de posición, velocidad y aceleración angular de cada una de las articulaciones. La comunicación de cada uno de los nodos sensores con el nodo maestro se realiza de forma inalámbrica. El tiempo de procesamiento del nodo maestro para obtener datos de los 7 nodos equivalen a un tiempo medio de 9,67 ms y tiene una desviación estándar de 0,057 ms. Tomando información de el nodo maestro, que utiliza mediciones angulares de los 7 nodos de sensores, un avatar está configurado para moverse en un PC o teléfono inteligente recreando los movimientos del paciente. Hay un retardo de movimiento de 33 ms entre el movimiento real del cuerpo y el del avatar. Este retraso es aceptable a efectos de la biorretroalimentación ya que el ojo humano puede percibir los movimientos de las imágenes a partir de un tiempo de muestreo de 13 ms.

4. Desarrollar un sistema integrado para el ambiente de realidad virtual y gestión del proceso de rehabilitación de marcha humana.

El sistema de información para el proceso de rehabilitación de marcha humana usando realidad virtual, y que consolida el sistema de medición electrónica de las variables de interés de la marcha humana con una propuesta lúdica para el desarrollo de las terapias de marcha, posee las siguientes propiedades: crea, actualiza y elimina pacientes; permite al usuario configurar los parámetros necesarios para la supervisión de la terapia de marcha; almacena en una base de datos la historia clínica, los datos generados en la terapia, y sus respectivas configuraciones; calcula las estadísticas del paciente a lo largo del juego como son pasos buenos, malos, total de puntos, valores máximos, mínimos de la longitud de paso, tiempo de paso y tiempo de marcha; y entrega al usuario un reporte básico que contiene las estadísticas calculadas previamente. Este desarrollo se realizó usando Unity y C#, la base de datos empleada fue PostgreSQL, la paleta de colores es compatible con el juego de la terapia y posee una apariencia clínicamente agradable. En la Figura 4.1 se muestra una secuencia de imágenes que evidencian en gran parte la implementación de estos requerimientos.



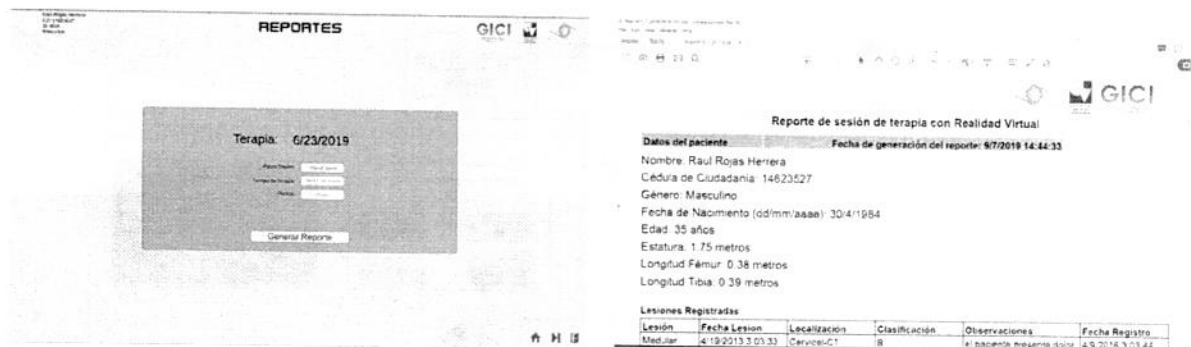


Figura 4.1 Interfaz de gestión de la terapia de marcha. De arriba hacia abajo, y de derecha a izquierda: módulo de historia clínica, módulo de configuración de parámetros, inicio del juego, módulo de visualización de variables de marcha, y módulo de reportes.

4.1 Modelo conceptual

Como una actividad de la etapa inicial de diseño, se construye un modelo conceptual, con el objetivo de representar los requerimientos consolidados del sistema. El modelo se presenta en la figura 4.2, en el cual, los actores principales son el fisioterapeuta y el paciente.

El fisioterapeuta se relaciona con el sistema mediante las acciones de: selección del nivel distractor, configuración de parámetros de la terapia y conexión con los sistemas externos. El paciente, por medio de la banda caminadora y de los sensores inerciales, puede interactuar con los objetos virtuales dispuestos como objetivos del juego. Los objetivos de juego se presentan en tres tipos de objetos virtuales, cada uno determinado para entrenar un parámetro específico de la marcha. Por cada interacción, el software genera la puntuación y las presenta en pantalla para realimentar al paciente con su progreso actual. La función de iniciar juego tiene como eventos alternativos el de pausar, reiniciar o salir del juego.

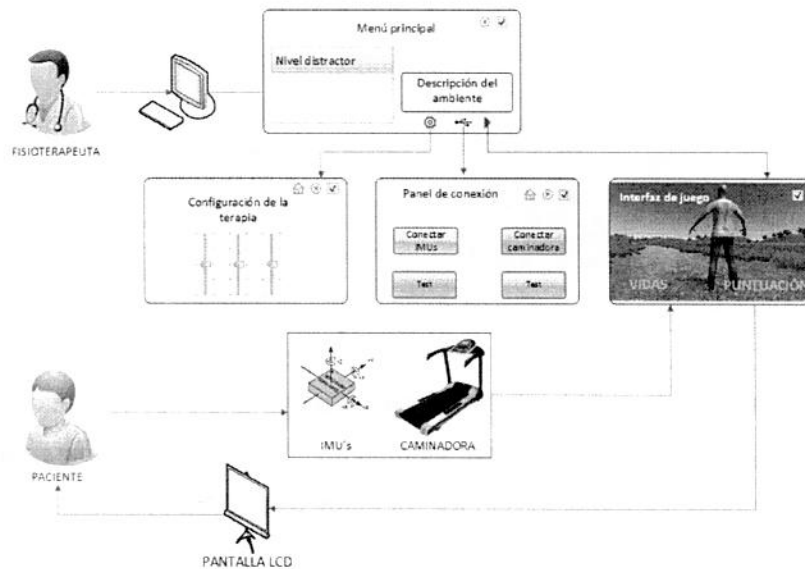
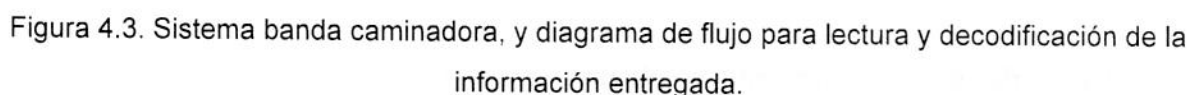


Figura 4.2. Modelo conceptual par la etapa de diseño.

4.2 Integración con la plataforma caminadora

Para sincronizar la velocidad del sistema banda caminadora con el mundo virtual, fue necesario integrar este sistema a la herramienta de R.V, de tal manera que se pueda extraer la información en línea mientras se ejecuta la terapia. Para esto también fue necesario crear una interfaz de mando de tal manera que el usuario pueda realizar las acciones principales para el uso de esta plataforma.

La información que entrega la caminadora se hace por medio de ocho registros que pueden ser de lectura y/o escritura, cada registro tiene un único identificador representado por un carácter imprimible ASCII. Para decodificar la trama se crea una estructura denominada "TreadmillData". Cada miembro de esta estructura corresponde a la información contenida en cada registro entregado por la caminadora. La información de las variables contenidas en dicha estructura es la que finalmente se implementa para los propósitos de la herramienta de realidad virtual. En la figura 4.3 se muestra el procedimiento principal para la lectura y decodificación de la información entregada a manera de diagrama de flujo.



El sistema de sensores inerciales desarrollado por (Luna 2017) y dispuesto para ser integrados en el sistema que aquí se desarrolla, considera como variables de interés las que representan el comportamiento angular de la cinemática de la marcha, la cual se usa para animación de los entornos virtuales. En la figura 4.4 se muestra el procedimiento para decodificar la información de la trama entregada. La información entregada por los sensores es decodificada en una estructura denominada “ImuData”, en la que cada miembro contiene una variable decodificada de la trama.

V-03-2016

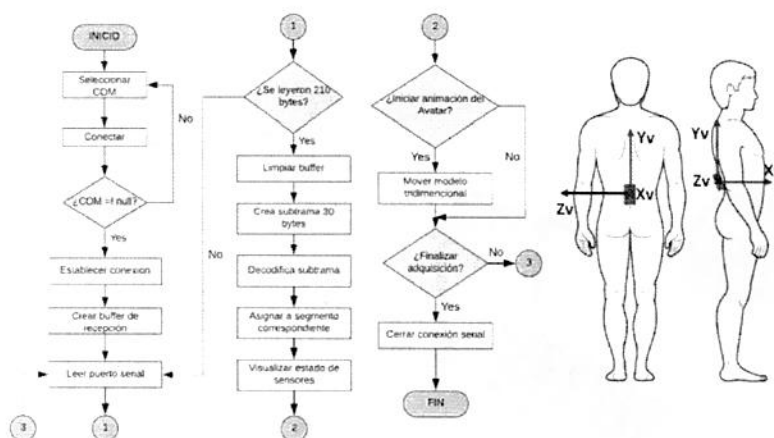


Figura 4.4. A. Diagrama de flujo para lectura y decodificación de la información de los sensores iniciales. B. Posición inicial para calcular la referencia virtual.

4.4 Interfaz de configuración y ambientes virtuales

Para la configuración de la terapia de realidad virtual se implementan 3 ventanas principales cuyo aspecto final se muestra en la figura 4.5. En la ventana principal se puede seleccionar el ambiente relacionado con el nivel distractor. En la ventana de configuración, el usuario puede editar todos los parámetros objetivos para el juego. Por último en la ventana de conexión se puede visualizar el estado tanto de los sensores como de la caminadora, y se pueden realizar pruebas de funcionamiento antes de iniciar el juego. En la figura 4.6 se muestran la captura de pantalla de los tres ambientes virtuales que proporcionan diferentes niveles de distracción.

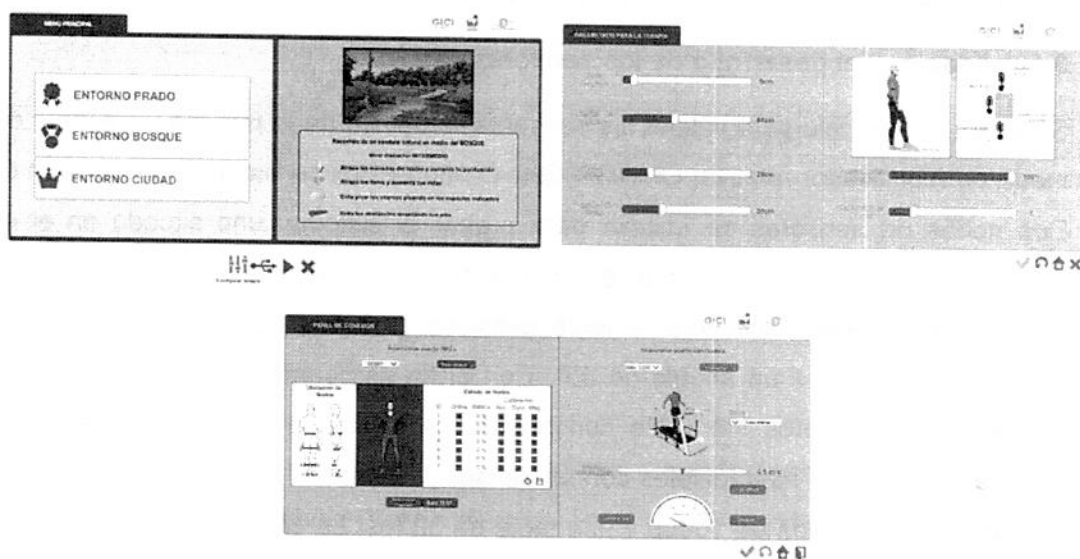


Figura 4.5. Ventanas implementadas para la configuración de la terapia con realidad virtual. Ventana principal, ventana para configuración del juego y ventana para la conexión de equipos.

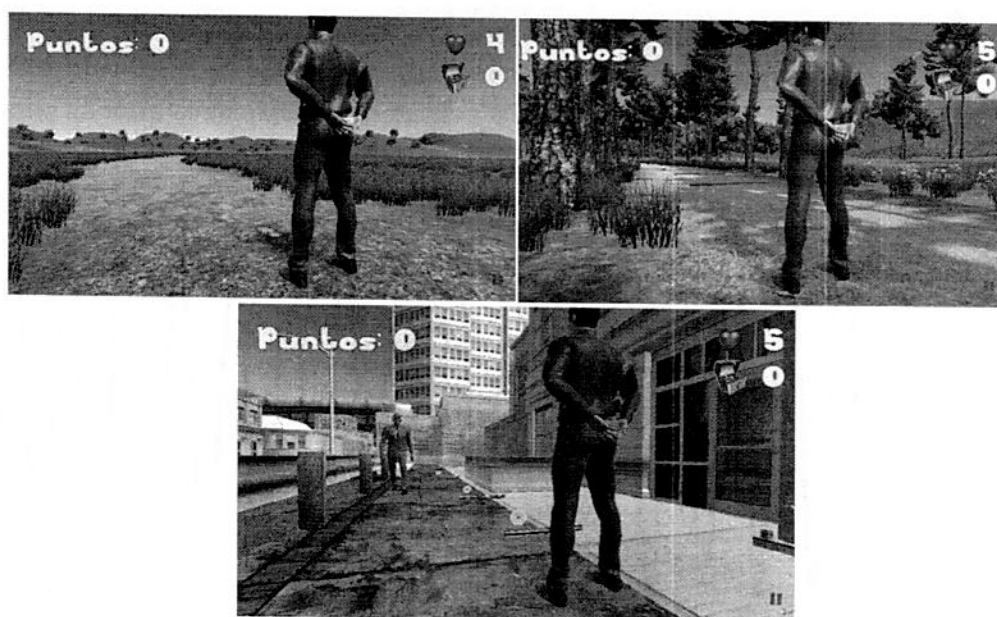


Figura 4.6. Ambientes virtuales definidos para 3 niveles de distracción.

5. Validar la funcionalidad del sistema desarrollado.

5.1 Validación del desarrollo de los sensores

Se utiliza un péndulo para validar los sensores inerciales de la marcha. El sensor de patrón de medición (codificador rotativo: OMRON E6D-C 3600 PPR) se fija al eje de rotación del péndulo. Dos nodos de sensores se utilizan para probar el sistema: uno situado en el extremo del péndulo y el otro sobre el soporte del chasis del péndulo. El nodo sensor se ubica de acuerdo con los planos anatómicos previamente definidos. Los dos nodos sensores (en condiciones iniciales) se ubican a un ángulo de 90° . Con el fin de comparar las mediciones realizadas a través de los sensores inerciales con el video software de análisis Kinovea, se utiliza una cámara digital de 13 megapíxeles con un sensor de tamaño $f/2.4$, $1/3''$ y una cámara de 1.12μ píxeles, una resolución de 1080p y una tarifa de 30 fps. La cámara es colocado en un trípode, perpendicular al plano del péndulo de rotación a una distancia de 0,47 m y a una altura de 0,93 m por encima del suelo. Al girar correctamente los nodos sensores, se pueden probar de forma independiente en los planos sagital, frontal y transversal.

La Fig. 4.7 muestra la excursión de la señal del encoder, del nodo sensor y Kinovea. También se muestra el error entre el encoder y el nodo del sensor, y el error entre el encoder y Kinovea para el plano sagital avión. Los resultados indican respuestas satisfactorias para el análisis de la marcha.

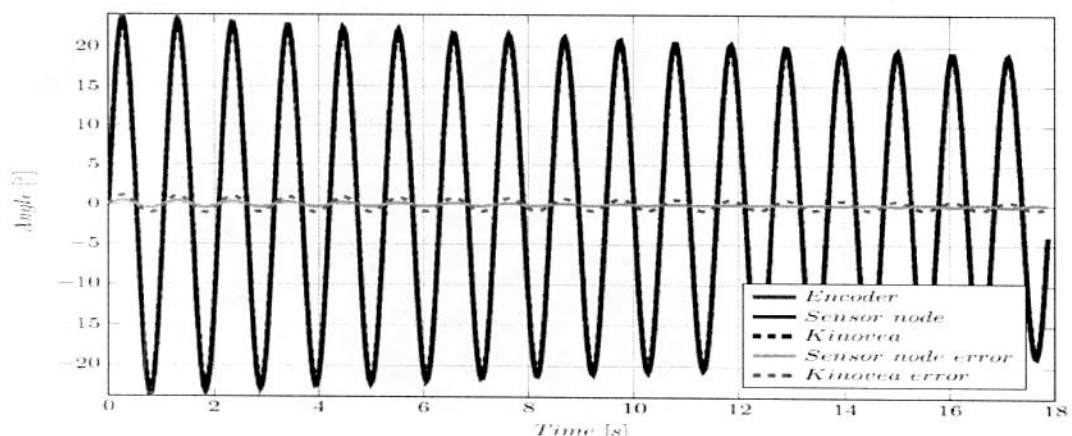


Figura 4.7. Ángulos y errores en el plano sagital

5.2 Validación funcional de la herramienta software de realidad virtual

La validación funcional de la herramienta se realizó con personas sanas en presencia del personal de fisioterapia. La prueba consistió en dar una breve introducción sobre el sistema. Luego se le pide al voluntario que interactúe con la interfaz de configuración, sin darle instrucciones, de tal manera que se pueda evaluar la facilidad de manejo. Por último se les pide que interactúen con los juegos de realidad virtual por medio de los sensores y la banda caminadora. Al final se les solicita responder una encuesta breve sobre su experiencia con la plataforma. En la figura 4.8 se presentan los resultados de algunas preguntas sobresalientes sobre el sistema. En el anexo F se presenta el resultado de la encuesta completa.

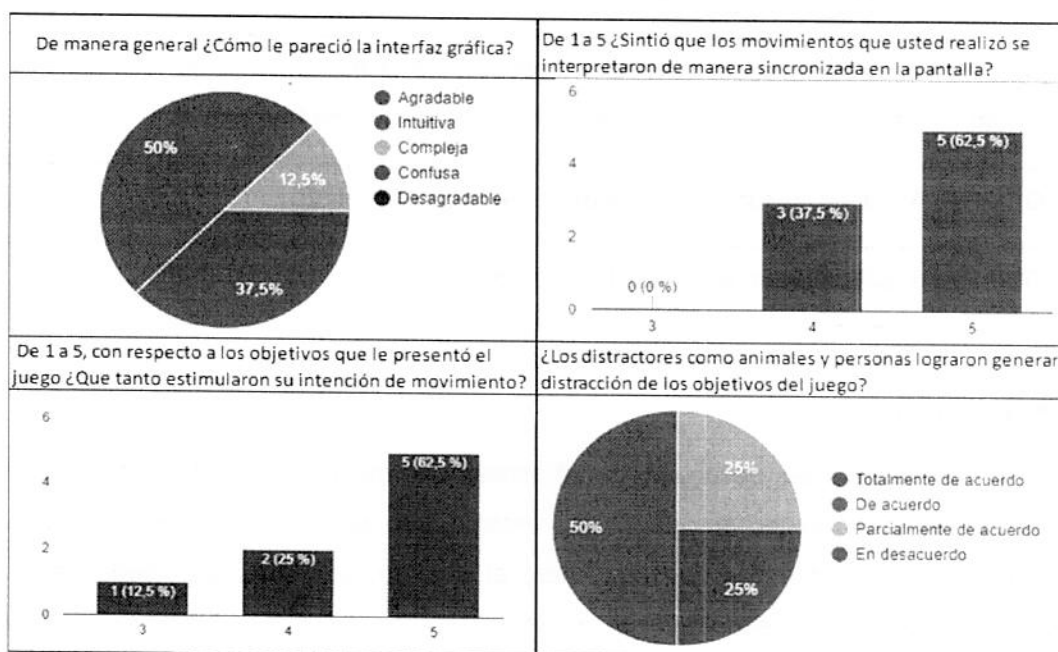


Figura 4.8. Resultados de algunas preguntas de la encuesta.

6. Difundir socialmente el proyecto.

El proyecto se difundió en eventos nacionales e internacionales, principalmente en eventos relacionados con rehabilitación y fisioterapia. (ver listado de productos)

Objetivo	Alcance
Objetivo 1: Obtener el estado del arte sobre plataformas de realidad virtual para la rehabilitación de la marcha humana.	100
Objetivo 2: Definir los requerimientos y las especificaciones de desempeño de la herramienta de realidad virtual para soportar la rehabilitación de la marcha humana.	100
Objetivo 3: Desarrollar un sistema de medición electrónica de las variables de interés para la marcha humana.	100
Objetivo 4: Desarrollar un sistema integrado para la herramienta de realidad virtual y la gestión del proceso de rehabilitación de marcha humana.	100
Objetivo 5: Validar la funcionalidad del sistema desarrollado.	100
Objetivo 6: Difundir socialmente el proyecto.	100

Metodología

Dado que se trata del desarrollo de un sistema de instrumentación, primero se definieron los requerimientos y especificaciones del sistema con el soporte de fisioterapeutas; luego se especificaron los objetivos deseados para el sistema, se realizó un diseño de la solución, se escogió y compró la tecnología de implementación, se implementó y se puso en marcha la solución y se analizó su validez evaluando el alcance de los objetivos planteados.

Resultados obtenidos

- Sistema de medición inalámbrica

Este sistema, ya descrito en el alcance del objetivo específico 3, presentó un comportamiento adecuado. Los resultados obtenidos de estos experimentos, evidencian

un error de $1,18^\circ$ para la articulación de cadera y $1,97^\circ$ para articulación de rodilla, los cuales se ubican en el intervalo de error de $1,65 \pm 0,55^\circ$ (Luna, 2017). Con lo que se determina la validez de la adquisición y adecuación de la señal entregada por los sensores inerciales. El sistema es bastante sensible ante perturbaciones magnéticas. Elementos como las bandas caminadoras, pueden generar este tipo de perturbaciones, ya que incorporan un sistema electrónico de potencia que controla el motor eléctrico, además sus estructuras se componen de materiales ferromagnéticos que pueden inducir desviaciones en la medida estimada por el magnetómetro, sobre la referencia del eje magnético terrestre. Para evidenciar este problema, se tomaron capturas de trayectorias angulares de la marcha, con los sensores ubicados sobre la persona, para dos escenarios diferentes: uno sobre un espacio fuera de la vecindad de la caminadora y el otro sobre la caminadora. El sistema de comunicación entre los sensores y el concentrador, presenta problemas frecuentes de conexión, lo que ocasiona pérdida de información durante la adquisición de la información. Estas pérdidas de conexión se presentan de dos maneras, intermitencia en el enlace entre los sensores y concentrador, es decir, pequeños lapsos de tiempo en los cuales el sensor pierde conexión y se vuelve a enlazar; el segundo evento es la pérdida de conexión total, en la que el sensor se desvincula del concentrador de manera definitiva, lo que ocasiona que la articulación del modelo virtual se quede paralizada en el valor de cero. Los problemas de desempeño de los sensores mencionados, generan diversos inconvenientes, que inevitablemente afectan los resultados de validación del sistema desarrollado.

- Plataforma de realidad virtual

Este sistema posee dos componentes que se probaron satisfactoriamente. El primero es el sistema de gestión del juego de terapia de marcha, al cual se le realizaron pruebas de integración propias de un desarrollo de software guiado por la metodología RUP (Rational Unified Process). El segundo, el juego en sí, para el cual se realizaron las siguientes pruebas: el error de representación de los ángulos de las articulaciones del avatar en relación al mundo real fue de $1.18^\circ \pm 0.55$ para la cadera, y $1.97^\circ \pm 0.55$ para la rodilla; debido a la presencia de varios elementos inductivos alrededor de la

caminadora, y por la caminadora misma, el sistema electrónico de medición de las variables de marcha es sensible a las perturbaciones magnéticas, para lo cual se optó por calibraciones continuas de los instrumentos con el fin de minimizar este tipo de perturbaciones; se calcularon los errores correspondientes a las longitudes de paso ($0.38\text{cm} \pm 0.12$), altura de paso ($0.14\text{cm} \pm 0.04$) y amplitud de paso ($0.14\text{cm} \pm 0.08$); adicionalmente, se realizaron encuestas para determinar la funcionalidad y experiencia de los usuarios ante la plataforma, lo cual arrojó los siguientes resultados: es una herramienta intuitiva y agradable (90%), se puede navegar adecuadamente (4.4, escala 1 a 5), el avatar imitó correctamente los movimientos (4.1, escala 1 a 5), la herramienta mostró sincronía con sus movimientos (4.7, escala 1 a 5), nivel de inmersión en los ambientes (4.5, escala 1 a 5), los distractores lograron su objetivo en la terapia (80% de acuerdo), y el nivel de experiencia positiva con la plataforma (4.7, escala 1 a 5).

Principales conclusiones y/o recomendaciones

Sistema de medición inalámbrica

Las pruebas de desempeño de los sensores inerciales, al ser utilizados sobre la caminadora, identificaron desviaciones en la medida angular entregada. Estas desviaciones se presentan de manera más fuerte sobre el plano transversal del cuerpo humano, es decir el plano paralelo a la superficie de la Tierra. Partiendo de que los sensores inerciales estiman sus mediciones a partir de la referencia del campo magnético de la Tierra, estas desviaciones pueden ser causadas por perturbaciones magnéticas, como las que se pueden generar en sistemas como la banda caminadora.

-Como consecuencia de los problemas relacionados con el desempeño de los sensores inerciales sobre la banda caminadora, un trabajo futuro puede considerar implementar otro tipo de sistema para la captura de la cinemática angular, que no se vean afectados por este tipo de disturbios. Sistemas de captura óptica como los *kinects* de la compañía Microsoft, se pueden integrar mejor.

Plataforma de realidad virtual

- Los desarrollos actuales de los entornos interactivos de realidad virtual para rehabilitación de la marcha, se centran principalmente en el objetivo terapéutico más que en los principios de diseño de la industria de videojuegos. Los principios de diseño de los juegos en rehabilitación se concentran en maximizar la motivación y participación del usuario. La revisión del estado de la información permite identificar que las actividades motivacionales presentadas en estos entornos de realidad virtual, en su mayoría, se relacionan con actividades cotidianas que las personas realizan en medio de ambientes amigables y atractivos.
- Con la revisión del estado de la información se logra identificar que los trabajos sobre realidad virtual se centran en parámetros específicos de la marcha, en algunos casos en un solo parámetro. Las modificaciones del patrón normal de marcha se presentan en casos muy diversos y dependiendo de la condición patológica específica se pueden presentar en conjunto, como en el caso de la longitud de paso y la altura de paso. Es decir, para el personal de fisioterapia es más práctico disponer de aplicaciones que les permita entrenar parámetros fuertemente relacionados para ciertos tipos de patologías de marcha. Lo que nos lleva necesariamente a enmarcar el desarrollo de la herramienta a ciertos parámetros, dependiendo de la necesidad y de la experiencia clínica del personal de fisioterapia.
- El marco teórico sobre aprendizaje motor, en su término amplio, nos muestra que es importante considerar la búsqueda de nuevas formas de realizar actividades interactivas para el aprendizaje del individuo con el entorno. Además allí se menciona que este tipo de actividades se deben tener en cuenta en los procesos de rehabilitación. Aspectos que marcan gran importancia durante el desarrollo de este tipo de herramientas.
- Las herramientas de Realidad Virtual han tenido buena acogida en el campo de la rehabilitación, pues es una manera efectiva para conectar la interacción del paciente con los dispositivos propios de este campo de aplicación y de manera general en todo tipo de entornos de aprendizaje. Es por ello que en los últimos años se han venido desarrollando muchas herramientas que permiten el desarrollo de este tipo de interfaz.

Herramientas de realidad virtual tales como Vizard y Unity3D se han desarrollado y han ido adquiriendo popularidad pues facilitan el desarrollo de varias aplicaciones interactivas.

- Las metodologías de diseño para este tipo de herramientas se diferencian en algunos aspectos con el desarrollo tradicional de las diferentes aplicaciones en la industria de los videojuegos, pues para estos diseños particulares resulta importante la interacción de los pacientes con los entornos clínicos para la rehabilitación.
- Para considerar como requerimiento en los desarrollos de videojuegos para terapia. El grado de dificultad de la terapia lúdica va relacionado directamente con el nivel de los objetivos de los parámetros a entrenar. El profesional de fisioterapia es el más indicado para seleccionar el grado de desafío para el paciente, por ello es necesario que la herramienta permita configurar estos parámetros. Pero se pueden tener niveles predefinidos de estímulos distractores, pues se ha notado que le generan dificultad al paciente mientras realiza su terapia.

4. Impactos actual o potencial:

Impacto académico. Se desarrolló una plataforma de experimentación para el análisis de marcha, así como una plataforma de realidad virtual para el proceso de rehabilitación de la marcha. Estas plataformas se han integrado a una caminadora y un sistema de control de peso (plataformas desarrolladas en otros proyectos) con el objeto de evaluar pacientes con dificultades de marcha. Se espera que en poco tiempo, este sistema sea usado de forma independiente en el SEHR de la escuela de rehabilitación humana de la Universidad del Valle.

Impacto de la investigación. Esta plataforma es idónea para hacer investigaciones relacionadas análisis de marcha, biofeedback, realidad aumentada y realidad virtual. Actualmente está siendo usada por un estudiante de doctorado, financiado por las becas de la gobernación del Valle del Cauca. Para propósitos de entrega de éste informe, se ha presentado un paper, y adicionalmente se está escribiendo un segundo paper.

Desarrollos futuros. A futuro el objetivo es integrarla con sistema de medición de fuerza plantar, con el objeto de desarrollar herramientas confiables que ayuden a las detecciones de caída de las personas, o al análisis de riesgos profesionales cuando las personas transportan cargas en su cuerpo. Para atacar este problema, se está escribiendo un proyecto con un candidato a las becas del bicentenario.

5. Productos:

Tabla No. 1. Cantidad y tipo de productos pactados en el *Acta de Trabajo y Compromiso* y productos finalmente presentados

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS				No. de PRODUCTOS PRESENTADOS			
Productos de nuevos conocimientos								
Artículo en revista ISI-SCOPUS:	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
		1				1 a somet er		
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
Libros de autor que publiquen resultados de investigación								
Capítulos en libros que publican resultados de investigación								



Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados				
· Prototipos y patentes				
· Software				
Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial				
Normas basadas en resultados de investigación				
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados	No. de tesis	No. De estudiantes Vinculados	No. De tesis
Estudiantes de pregrado		2	4	2
Semillero de Investigación	1		3	
Estudiantes de maestría				
Estudiantes de doctorado	1			
Joven investigador				
Productos de divulgación				
Publicaciones en revistas no indexadas				
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales

	1	1	2	6
Propuesta de investigación				
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación	1		2	

Tabla No. 2. Detalle de productos

Tipo de producto:	Artículo a someter
Nombre General:	Wearable Virtual Reality System for Gait Monitoring with Wireless Inertial Sensors. Revista: IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems
Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	Cali, 23 de mayo de 2019.
Participantes:	Alejandro Astudillo, Edna Avella, Gloria Arango, José Miguel Ramírez, Esteban Rosero
Sitio de información:	NA
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial -GICI-, Grupo de Investigación en Percepción y Sistemas Inteligentes -PSI-, Grupo Sinergia

Tipo de producto:	Estudiante de doctorado vinculado (Doctorado en Ingeniería con énfasis en Eléctrica y Electrónica)
Nombre General:	Control de asistencia parcial en una plataforma robótica con exoesqueleto para la rehabilitación de la marcha humana



Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	Cali, Colombia, fecha de presentación pública de la propuesta: 21 de octubre de 2016
Participantes:	Sergey González
Sitio de información:	Propuesta en ejecución
Formas organizativas:	Grupo de investigación en control industrial -GICI-

Tipo de producto:	Tesis de pregrado (Fisioterapia)
Nombre General:	Uso de la realidad virtual en la rehabilitación de la marcha y el balance: revisión exploratoria
Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	Ciudad: Cali. Fecha de sustentación pública: 25 de agosto de 2017
Participantes:	Daniela Ortiz Muñoz (semillero de investigación) y Juan Sebastian Sanclemente (semillero de investigación)
Sitio de información:	Biblioteca Mario Carvajal, Universidad del Valle
Formas organizativas:	Grupo Sinergia



Tipo de producto:	Tesis de pregrado (Ingeniería Electrónica)
Nombre General:	Desarrollo de un sistema de mando y control integrado de los subsistemas de la plataforma de rehabilitación de la marcha humana
Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	Ciudad: Cali. Fecha de sustentación pública: 20 de mayo de 2019
Participantes:	Elkin Mauricio Echeverry (semillero de investigación)
Sitio de información:	Biblioteca Mario Carvajal, Universidad del Valle
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial

Tipo de producto:	Ponencia internacional
Nombre General:	VIII Jornadas AITADIS de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad
Nombre Particular:	Active Body Weight Support System for Lower Limb Rehabilitation
Ciudad y fechas:	Ciudad de México, México. Fecha de publicación: 29-30 de noviembre de 2018
Participantes:	Alberto Loaiza, José Miguel Ramirez, Esteban Rosero
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación



Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial
-----------------------	--

Tipo de producto:	Ponencia internacional
Nombre General:	IX Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad: Iberdiscap 2017
Nombre Particular:	Silvereye, sistema electrónico para el análisis de la marcha humana en el plano sagital a partir de sensores inerciales
Ciudad y fechas:	Ciudad: Bogotá, Colombia. Fecha de publicación: 22-24 de noviembre de 2017
Participantes:	Juan Manuel Luna, Alejandro Astudillo, Fabio Guerrero, Esteban Rosero
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial

Tipo de producto:	Ponencia internacional
Nombre General:	IX Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad: Iberdiscap 2017
Nombre Particular:	Uso de la realidad virtual en la rehabilitación de la marcha: revisión exploratoria
Ciudad y fechas:	Ciudad: Bogotá, Colombia. Fecha de publicación: 22-24 de noviembre de 2017



Participantes:	Daniela Ortiz Muñoz, Juan Sebastian Sanclemente, Gloria Arango y José Ramírez
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial, Grupo Sinergia

Tipo de producto:	Ponencia internacional
Nombre General:	IX Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad: Iberdiscap 2017
Nombre Particular:	Uso de la realidad virtual en la rehabilitación del balance: revisión exploratoria
Ciudad y fechas:	Ciudad: Bogotá, Colombia. Fecha de publicación: 22-24 de noviembre de 2017
Participantes:	Juan Sebastian Sanclemente, Daniela Ortiz Muñoz, Gloria Arango y Lesby Gómez
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial, Grupo Sinergia

Tipo de producto:	Ponencia internacional
Nombre General:	IX Congreso Iberoamericano de Tecnologías de Apoyo a la Discapacidad: Iberdiscap 2017



Nombre Particular:	Gait Assisted Rehabilitation Platform -RUVEM-
Ciudad y fechas:	Ciudad: Bogotá, Colombia. Fecha de publicación: 22-24 de noviembre de 2017
Participantes:	Sergey González, José Ramírez
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial, Grupo Sinergia

Tipo de producto:	Ponencia internacional
Nombre General:	II Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2019
Nombre Particular:	Control de asistencia parcial en una plataforma robótica con exoesqueleto para la rehabilitación de la marcha humana
Ciudad y fechas:	Ciudad: Cartagena de Indias, Colombia. Fecha de publicación: 10-13 de septiembre de 2019
Participantes:	Sergey González, José Ramírez
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial



Tipo de producto:	Ponencia internacional
Nombre General:	Latin American Conference on Automatic Control
Nombre Particular:	Drive System Development for Gait Rehabilitation Exoskeleton
Ciudad y fechas:	Ciudad: Medellín, Colombia. Fecha de publicación: 12-15 de octubre de 2016
Participantes:	Sergey González, José Ramírez
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial

Tipo de producto:	Ponencia internacional
Nombre General:	Latin American Conference on Automatic Control
Nombre Particular:	Drive System Development for Gait Rehabilitation Exoskeleton
Ciudad y fechas:	Ciudad: Medellín, Colombia. Fecha de publicación: 12-15 de octubre de 2016
Participantes:	Sergey González, José Ramírez
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación



Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial
-----------------------	--

Tipo de producto:	Propuesta sometida para financiación con recursos externos
Nombre General:	Nombre de la propuesta: Eurobench: Monitoring and Control Platform. Enviado a: European Robotic Framework for Bipedal Locomotion Benchmarking
Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 779963
Participantes:	José Ramírez, Esteban Rosero
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial

Tipo de producto:	Propuesta sometida para financiación con recursos externos
Nombre General:	Sistema portable de telediagnóstico de riesgo de caídas para poblaciones con enfermedades crónicas no transmisibles
Nombre Particular:	NA
Ciudad y fechas:	Colciencias

Participantes:	Gloria Arango, Lesby Gómez, Bladimir Bacca, Esteban Rosero
Sitio de información:	Archivos del Grupo de Investigación
Formas organizativas:	Grupo de Investigación en Control Industrial -GICI-, Grupo de Investigación en Percepción y Sistemas Inteligentes -PSI-, Grupo Sinergia, Biomecánica.

Bibliografía

- Alahmari, Khalid et al. 2014. "Comparison of Virtual Reality Based Therapy with Customized Vestibular Physical Therapy for the Treatment of Vestibular Disorders." *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* 22(2): 389–99.
- Angus, Antley, and Slater Mel. 2011. "The Effect on Lower Spine Muscle Activation of Walking on a Narrow Beam in Virtual Reality." 8(4): 511–13.
- Antonsson, Erik K, and Robert W Mann. 1985. "The Frequency Content of Gait." *Journal of Biomechanics* 18(1): 39–47.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0021929085900430>.
- "Association for Applied Psychophysiology and Biofeedback." <http://www.aapb.org/i4a/pages/index.cfm?pageid=1> (March 17, 2017).
- Astudillo, Alejandro. 2016. "Diseño y Desarrollo de un Sistema de Telerrehabilitación Física Basados en Teléfonos Inteligentes y Captura de Movimiento con Sensores de Medición Inercial." Joven Investigador, Universidad del Valle.
- Beravs, Tadej et al. 2011. "Development and Validation of a Wearable Inertial Measurement System for Use with Lower Limb Exoskeletons." *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*: 212–17.
- Bergmann, and Krewer. 2011. "Virtual Reality to Control Active Participation in a Subacute Stroke Patient during Robot-Assisted Gait Training."
- Biffi, E. et al. 2015. "Gait Rehabilitation with a High Tech Platform Based on Virtual Reality Conveys Improvements in Walking Ability of Children Suffering from Acquired Brain Injury." *2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in*



- Medicine and Biology Society (EMBC):* 7406–9.
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7320103>.
- Biswas, Karnika, Oishee Mazumder, and Ananda Sankar Kundu. 2012. "Multichannel Fused EMG Based Biofeedback System with Virtual Reality for Gait Rehabilitation." *4th International Conference on Intelligent Human Computer Interaction: Advancing Technology for Humanity, IHCI 2012*.
- Casanova, Mario Samuel, John E. Munoz, Oscar Alberto Henao, and David Sebastian Lopez. 2015. "Exergames as a Tool for the Assessment of Postural Balance in a Patient with Multiple Sclerosis: The Role of Biomechanical Analysis in the Quantification of Movement." *2015 10th Computing Colombian Conference (10CCC):* 261–68.
- Echeverri, Mauricio, and José Miguel Ramírez. 2019. "DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MANDO Y CONTROL INTEGRADO DE LOS SUBSISTEMAS DE LA PLATAFORMA DE REHABILITACIÓN DE LA MARCHA HUMANA."
- Fung, Joyce, and Claire F Perez. 2011. "Sensorimotor Enhancement with a Mixed Reality System for Balance and Mobility Rehabilitation." : 6753–57.
- Gottshall, Kim R., Pinata H. Sessoms, and Jamie L. Bartlett. 2012. "Vestibular Physical Therapy Intervention: Utilizing a Computer Assisted Rehabilitation Environment in Lieu of Traditional Physical Therapy." *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*: 6141–44.
- Götz, Ulrich et al. 2011. "A Virtual Reality System for Robot-Assisted Gait Training Based on Game Design Principles." *Virtual Rehabilitation (ICVR)*: 1–2.
- Guzmán, César Humberto. 2010. "Construcción de un Robot Bípedo basado en Caminado Dinámico."
- Luna, Manuel. 2017. "Sistema Electrónico para el Análisis de la Marcha Humana en el Plano Sagital, Juan Manuel Luna López, Universidad del Valle."
- Luu, Trieu Phat, Yongtian He, Samuel Brown, and Jose L Contreras-vidal. 2017. "Gait Adaptation to Visual Kinematic Perturbations Using a Real- Time Closed-Loop Brain Computer Interface to a Virtual Reality Avatar." *13(3):* 1–28.

- Medica. 2006. "Estimulación Con Realidad Virtual."
<https://www.gaesmedica.com/uploads/imagen/1384-brochure-medicaa-415-425-es-ilov-epdf-compressed-1.pdf>.
- Mirelman, A., and N. Raphaely Beer. 2011. "Treadmill Training with Virtual Reality to Decrease Risk of Falls in Idiopathic Fallers: A Pilot Study." *2011 International Conference on Virtual Rehabilitation, ICVR 2011*: 7–10.
- Moreira, Marcela Cavalcanti, and De Amorim Michelle. 2013. "Disability and Rehabilitation : Assistive Technology Use of Virtual Reality in Gait Recovery among Post Stroke Patients – a Systematic Literature Review Systematic Literature Review." 3107.
- nas.nasa.gov. 2016. "Virtual Reality." <https://www.nas.nasa.gov/Software/VWT/vr.html> (December 12, 2016).
- Páez, Miguel Ángel Leguizamón, and Olga Najar Sánchez. 2008. "Creación de Ambientes Virtuales como Apoyo en el Desarrollo de Asignaturas a Interior de la Licenciatura en Informática Educativa." *Red Iberoamericana de Informática Educativa (RIBIE)*: 1–10.
- Pereira, E. Monge, and F. Molina Ruedab. 2012. "Empleo de Sistemas de Realidad Virtual como Método de Propiocepción en Parálisis Cerebral: Guía de Práctica Clínica." 29(9): 550–59.
- Peruzzi, Agnese, Andrea Cereatti, Ugo Della, and Anat Mirelman. 2016. "Effects of a Virtual Reality and Treadmill Training on Gait of Subjects with Multiple Sclerosis: A Pilot Study." *Multiple Sclerosis and Related Disorders* 5: 91–96.
- Polk, John D, Sarah P Psutka, and Brigitte Demes. 2005. "Sampling Frequencies and Measurement Error for Linear and Temporal Gait Parameters in Primate Locomotion." *Journal of Human Evolution* 49(6): 665–79.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0047248405001363>.
- Prat, Jaime, and Javier Sánchez. 1993. *Biomecánica de la Marcha Humana Normal y Patológica*.
- Ravi, D K, N Kumar, and P Singhi. 2016. "Effectiveness of Virtual Reality Rehabilitation for Children and Adolescents with Cerebral Palsy: An Updated Evidence-Based Systematic Review." *Physiotherapy*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physio.2016.08.004>.



- Rehabimedic. 2012. "Rehabilitación Virtual."
<https://www.rehabimedic.com/catalogo/rehabilitacion-virtual/> (March 19, 2018).
- Rudinskiy, Mikhail et al. 2014. "Dual Actuated Gait Rehabilitation Treadmill Implementing Virtual Reality and Visual Postural Feedback." *Proceedings of the IEEE Annual Northeast Bioengineering Conference, NEBEC 2014*–Decem: 1–2.
- Shema, S et al. 2013. "Clinical Experience Using a 5 Week Treadmill Training Program with Virtual Reality to Enhance Gait." : 249–53.
- Shumway, Anne, and Marjorie H. Woollacott. 2001. *Motor Control. Theory and Practical Applications*.
- Sommerville, Ian. 2011. *Ingeniería de Software, 9th Ed. Pearson*.
http://artemisa.unicauca.edu.co/~cardila/Libro_Somerville_9.pdf.
- Sprager, Sebastijan, and Matjaz B. Juric. 2015. 15 Sensors (Switzerland) *Inertial Sensor-Based Gait Recognition: A Review*.
- Universidad Militar Nueva Granada. 2016. "Ambientes Virtuales - UMNG."
<http://www.umng.edu.co/ambientes-virtuales> (December 12, 2016).
- Viñas, S., and M. Sobrido. 2016. "Realidad Virtual con Fines Terapéuticos en Pacientes con Ictus: Revisión Sistemática." 31(4).
- Yanlin, Shia, and Peng Qingjin. 2018. "A VR-Based User Interface for the Upper Limb Rehabilitation." 78: 115–20. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.311>.
- Zhang, Heng et al. 2016. "Computers , Environment and Urban Systems A Rule-Based Parametric Modeling Method of Generating Virtual Environments for Coupled Systems in High-Speed Trains." 56: 1–13.
- Zimmerli, Lukas et al. 2009. "Virtual Reality and Gait Rehabilitation: Augmented Feedback for the Lokomat." *2009 Virtual Rehabilitation International Conference, VR 2009*: 150–53



La presente versión del informe contiene las observaciones de los evaluadores:

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones

*Por favor presente su informe impreso y en formato digital en hoja tamaño carta, letra arial 11,
con espacios de 1 1/2*

