

Desarrollo de un sistema para neurorehabilitación basado en plataforma de balance y mini-pc

César Arrasin¹, César Martínez^{1,2}, and Enrique Albornoz^{1*}

¹ Instituto de Investigación en Señales, Sistemas e Inteligencia Computacional, **sinc**(i)
FICH-Universidad Nacional del Litoral - CONICET
<http://sinc.unl.edu.ar>

² Laboratorio de Cibernética, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos
(* emalbornoz@sinc.unl.edu.ar)

Resumen En los últimos años se han presentado diversos sistemas que capturan el movimiento de una persona, siendo inicialmente empleados en la industria de videojuegos a fin de generar nuevas experiencias en un ambiente inmersivo del jugador. En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de asistencia a profesionales de la neurorehabilitación, basado en dispositivos sensoriales utilizados para los *videojuegos del ejercicio* (*exergames*). El mismo está conformado por una plataforma de balance y software desarrollado ad-hoc que corre sobre una mini-PC. Los profesionales médicos diseñaron un conjunto de ejercicios para la evaluación de pacientes neurológicos con trastornos del equilibrio. Finalmente, se crearon diversos *exergames* cuyas funciones lúdicas hacen para el paciente una terapia más motivadora, a la vez que registran los parámetros de interés para los profesionales. El sistema permitirá, además, el seguimiento de terapias y la personalización de las mismas según la evolución de cada paciente.

Palabras claves: exergames, neurorehabilitación, plataforma de balance WII, equilibrio, balance.

1. Introducción

Las personas que sufren trastornos del equilibrio ven notoriamente afectada su calidad de vida. Esto les genera una alta dependencia para realizar tareas cotidianas, mayor probabilidad de caídas y las consecuentes fracturas, sobre todo en pacientes ancianos, conduciendo a una vida más sedentaria [1,2]. En el proceso de neurorehabilitación del equilibrio, la terapia física juega un papel importante en el tratamiento, mejorando las capacidades del paciente para realizar tareas cotidianas, afrontando las dificultades que presenta realizarlas con este trastorno. Esta terapia contempla la realización de una variedad de ejercicios que sirven tanto para el tratamiento, como para determinar la evolución del paciente [2,3]. Los profesionales terapéuticos evalúan la evolución del paciente con base en una serie de ejercicios, que se pueden complementar mediante la utilización de celdas

o plataformas de fuerza (PF) (Figura 1). Los pacientes realizan ejercicios sobre las plataformas y éstas miden las fuerzas de reacción y momentos, los cuales se utilizan para calcular el centro de presión (CdP) del paciente (Figura 2). La terapia física se nutre de este valor para diagnosticar de manera objetiva la capacidad de equilibrio del paciente y poder medir su evolución. Las plataformas consideradas "gold-standard" rondan los US\$20.000³, y entre las empresas que venden estos equipos podemos nombrar AMTI⁴, Kistler⁵ y Bertec⁶. Estos altos costos limitan su uso solo a algunos centros de rehabilitación y su portabilidad se ve condicionada por su peso de aprox. 30 kg.

Este trabajo propone utilizar dispositivos que puedan ser utilizados como medios alternativos de sensado y que tienen bajo costo, y que si bien han sido pensados con un objetivo inicialmente lúdico, actualmente muchos trabajos científicos validan su uso. La motivación para su desarrollo es la posibilidad de generar videojuegos activos o *exergames*, término que refiere a los videojuegos que incluyen la ejercitación física, y han existido desde la década del '80 y han despertado un notable interés desde el lanzamiento de dispositivos como la Dance Dance Revolution (1998), Wii Nintendo (2006), Nintendo Wii balance board (WBB,2007) y Microsoft Kinect (2010) [4]. Consecuentemente, se han convertido en una importante ayuda para muchos profesionales del campo de la salud: fisioterapeutas, profesores de educación física, médicos, etc. [5].

En la ciudad de Santa Fe, se encuentra el Centro de Rehabilitación e Investigación "Dr. Esteban Laureano Maradona" donde los especialistas están interesados en utilizar la WBB, pero no sólo como simples usuarios de juegos puramente lúdicos, sino mediante exergames específicamente diseñados para determinar la evolución y realizar el seguimiento de los pacientes con trastornos de equilibrio. En este sentido, y dado que ya existe un marco de colaboración entre el Centro y el Instituto sinc(i) donde se realizara este proyecto, se propone implementar un sistema de rehabilitación que tenga la capacidad de proveer información acerca de la realización de los ejercicios y realizar un seguimiento de la evolución del paciente, necesidades manifiestas por los especialistas del Centro.

En este contexto, se vislumbra como un nicho de mercado al desarrollo de un producto integral que contemplen el uso de tecnologías de bajo costo y mas ligeras, como alternativas a otras mas tradicionales, costosas y pesadas. Además, este producto tiene en cuenta no solo los ejercicios de rehabilitación que se mencionaron anteriormente, sino también herramientas que permiten determinar la evolución y el seguimiento del paciente.

Este desarrollo contempla el uso de una variedad de dispositivos (mini-pc, WBB, TV y cámara de video) (Figura 3) para los que fue necesario diseñar

³ AMTI por Optimized Accusway, con software clínico y de entrenamiento US\$11.850 (actualizado el 12/07/2018), AMTI por OPT400600 sin software US\$16.380 (actualizado el 12/07/2018)

⁴ <http://www.amti.biz/optima.aspx>

⁵ <https://www.kistler.com/en/applications/sensor-technology/biomechanics-and-force-plate/gait-analysis>

⁶ <http://bertec.com/bertecbalance/our-products/functional>

e implementar protocolos de comunicación ayudando a la integración de los mismos.

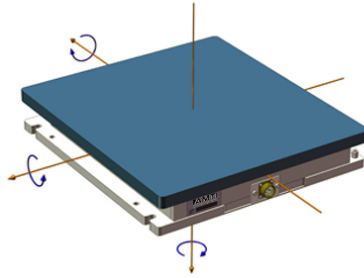


Figura 1. Plataforma de Fuerza Por AMTI, <https://www.amti.biz/images/0R6-7-forces-diagram.jpg>

2. Dispositivos y Metodología

2.1. Wii Balance Board

La Wii Balance Board (WBB) es un dispositivo de la consola Wii (Figura 4) y ha sido validada como herramienta útil para la rehabilitación, y utilizando los juegos de la consola como *exergames* se exponen mejoras respecto a realizar los ejercicios tradicionales [6,7] (Figura 5). Lo más destacable de la WBB es que posee componentes similares a los de una PF, pesa sólo 3,5 kg., tiene 4 sensores capaces de medir las fuerzas de reacción del jugador, y envía esta información a la consola por bluetooth [8,9]. El precio de este accesorio, mucho menor que el de las PF, ronda un valor de US\$80. Existen trabajos previos en los que se han desarrollado diversos software, ejecutados en computadoras, para obtener los datos de los sensores vía bluetooth y calcular el Cdp del paciente [10]. Se ha podido comprobar su fiabilidad y validez para la rehabilitación del balance [11], a pesar de las limitaciones técnicas de la WBB, como ser: la falta de sensado de momentos y de fuerzas de corte; una gran componente de ruido en las señales sensadas y una frecuencia de muestreo variable, entre otras.

2.2. Mini-pc

El objetivo de este trabajo es abordar la implementación de *exergames* que utilicen la WBB para rehabilitación en una computadora, evitando el uso de la consola Wii. No sólo se evitará el uso de la consola porque ya no se fabrica; sino que también permitirá adicionar el software de seguimiento y la posibilidad



Figura 2. Plataforma de Fuerza en rehabilitación Por BioMera, 2012, <http://www.stabiloplatforma.ru/photo/stabiloplatforma-sport.JPG>

de incorporar una cámara de video. Esta cámara junto con la portabilidad de la WBB, posibilitaría al profesional realizar el tratamiento de manera remota, trasladando únicamente los dispositivos al lugar donde esté el paciente. En este contexto de portabilidad, nos enfocaremos en las computadoras de tamaño reducido o mini-pc, obteniendo un sistema portable y útil. Al utilizar mini-pc con conexión a TV, permitirá al paciente tener una realimentación visual de sus movimientos [12].

2.3. Raspberry Pi

La mini-pc Raspberry Pi fue desarrollada en 2012 por la Fundación Raspberry Pi con el objetivo de estimular la educación informática en las escuelas y en países en desarrollo. Desde el año de su lanzamiento han presentado diferentes variantes de sus modelos de computadora de placa de reducida (o SBC), del tamaño de una tarjeta de crédito (Figura 6). Estos modelos buscan un equilibrio

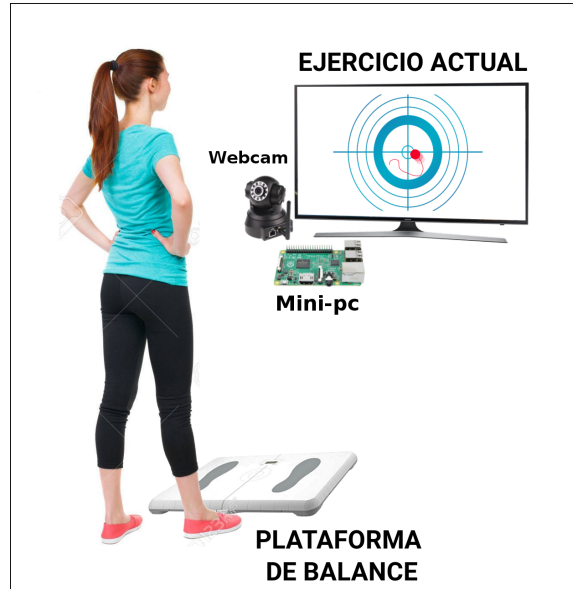


Figura 3. Producto integral

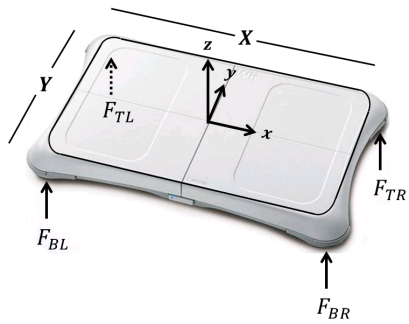


Figura 4. Wii Balance Board En "Validating and Calibrating the Nintendo Wii Balance Board to Derive Reliable Center of Pressure Measures", por Leach, J. M., 2014, <https://www.researchgate.net/>

de la relación de compromiso de sus objetivos: proveer el rendimiento de una PC y mantener un bajo costo. Esta fundación lleva adelante también el desarrollo de un sistema operativo, el mismo es libre basado en Debian Linux, llamado Raspbian.

En su último modelo 'Raspberry Pi 3B+', lanzado en 2018, han logrado integrar una conexión inalámbrica, tanto WiFi como Bluetooth, incrementar notoriamente el rendimiento del procesador y el tamaño de la memoria (com-



Figura 5. Wii Balance Board en Rehabilitación. En “Wii Fit Yoga - A Fun Way to Manage Your Back Pain”, por bestforbackpain.com, 2017

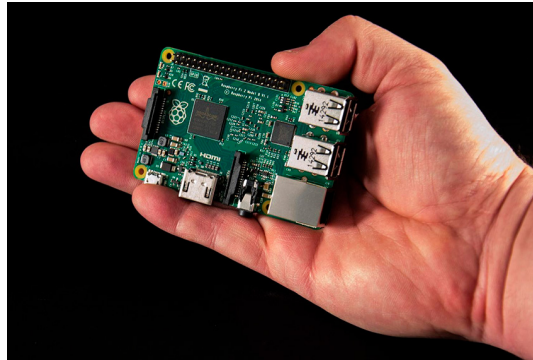


Figura 6. Raspberry Pi

parándolo con el modelo original 'Raspberry Pi 1 A'). A pesar de esta evolución del proyecto, existe una política de soporte prolongado, característica importante si deseamos realizar un producto utilizando esta mini-pc, ya que no sólo porque seguirán fabricándose modelos varios años después de su lanzamiento, sino también que podemos ir mejorando nuestro producto con futuros modelos sin mayor esfuerzo. A modo de comparación, la Tabla 1 resume las características principales de las principales mini-pc que se encuentran en el mercado.

2.4. Exergames

El éxito de los *exergames* depende de la atracción o diversión que genera al usuario y puede definirse como el balance entre las habilidades del jugador respecto de los desafíos del juego (componente psicológico del juego) [13]. A diferencia de otros videojuegos, los exergames incluyen un componente fisiológico

Tabla 1. Precio y características de mini-pcs, con WiFi y Bluetooth incorporado

Mini-pc	CPU		Memoria	Precio
	cores	GHz		
Raspberry Pi 3 B+	4	1,4	1 Gb	us\$35
Radxa Rock Pi 4 Model B	2	2	1 Gb	us\$39
Pine A64-LTS	4	1,2	2 Gb	us\$42
NanoPi Neo4	2	2	1 Gb	us\$50
Banana Pi M64	4	1,2	2 Gb	us\$61
NanoPC-T3 Plus	8	1,4	2 Gb	us\$75
NanoPi M4	6	2	2 Gb	us\$75
BeagleBone Black Wireless	1	1	512 Mb	us\$75
Asus Tinker Board S	4	1,8	2 Gb	us\$89
LattePanda	4	1,8	2 Gb	us\$119

que, para el ámbito de la neurorehabilitación, representa la evolución del paciente. Esta evolución, depende del balance entre las capacidades del paciente y la intensidad de la actividad.

Si el exergame de rehabilitación es divertido, el paciente puede lograr un estado de afinidad con el juego. Esto es muy importante ya que genera concentración y foco en el ejercicio, alterando su percepción del paso del tiempo. Consecuentemente, es posible lograr una mayor frecuencia en la realización de los ejercicios y mayor motivación del paciente. Pero si el componente fisiológico no es efectivo, podría llevar a un deterioro de las capacidades del paciente sin importar la frecuencia de juego. Este doble objetivo es determinante tanto para la parametrización de los desafíos o dificultad del juego y la intensidad del ejercicio, como así también para el monitoreo del cumplimiento de los objetivos (habilidades del paciente) y la evolución de las capacidades del paciente. De esta manera se puede adaptar el juego a las habilidades y evolución del paciente, manteniéndolo comprometido con el ejercicio y evolucionando favorablemente (regla *"dorada del flujo"* de la teoría del flujo [14]).

2.5. Pygame y WiiBoard

Para el desarrollo de los exergames se ha utilizado Pygame, que es una librería de código abierto del lenguaje de programación Python que permiten la creación de videojuegos en dos dimensiones, es multiplataforma basada en la librería SDL 1.2. La misma posee funcionalidades para manejo de sprites, detección de colisiones, acceso a cámaras, transformaciones, filtrado, entre otras. Otro factor a destacar de dicha librería es que se encuentra disponible en los paquetes provistos por el S.O. Raspbian.

Para la comunicación con la WBB se utilizó la librería wiiboard⁷, esta también es una librería de Python que extiende las funcionalidades de wiimote⁸

⁷ <https://code.google.com/archive/p/wiiboard-simple/>

⁸ Wiimote: permite la comunicación con los controles remotos de la plataforma Wii.

permitiendo la comunicación con la WBB de Nintendo. Esto permite obtener los valores de los 4 sensores de fuerza.

3. Ejercicios de rehabilitación

Como resultado de las reuniones con los profesionales del Centro de Rehabilitación e Investigación “Dr. Esteban Laureano Maradona”, se seleccionaron tres ejercicios terapéuticos, diseñados por los profesionales del Centro.

En todos los ejercicios el paciente debe mover un objeto en la TV (representado con una mira) balanceando el cuerpo hacia un objetivo.

- Un ejercicio de evaluación funcional: este ejercicio consiste en el paciente debe inclinar su cuerpo en 6 direcciones establecidas: adelante-izquierda, adelante, adelante-derecha, atrás-izquierda, atrás, atrás-derecha. Manteniendo el balance en dicha posición por un tiempo, regresando a la posición inicial para luego inclinar el cuerpo en la dirección siguiente.
- Dos ejercicios de los llamados de entrenamiento:
 - El primer ejercicio de este tipo el paciente debe balancear el cuerpo en direcciones aleatorias (no establecidas) planteadas por el “juego”.
 - En el segundo ejercicio de entrenamiento, el paciente debe respetar un orden en el que están planteados los objetivos. Este orden se establece mediante colores, realizando una tarea cognitiva mientras ejercita el balance.

En base a estos ejercicios se plantearon 2 *exergames*:

1. Uno con un único nivel y no se podrá modificar la dificultad del mismo. En este juego se realizará el ejercicio de evaluación funcional (Figura 7).
2. Otro con diferentes dificultades y niveles, donde se realizarán los dos ejercicios de entrenamiento (Figura 8 y Figura 9)

Los siguientes enlaces muestran cada uno de los 3 ejercicios, sus objetivos y forma de uso:

- Ejercicio 1: <http://bit.ly/2F9nVbK>
- Ejercicio 2: <https://youtu.be/1SvykkqnkQM>
- Ejercicio 3: <https://youtu.be/UjiMc3J3H9A>

4. Discusiones y próximos avances

El sistema propuesto presenta un grado de desarrollo muy importante, dado que el hardware y rutinas básicas están finalizadas. Se han implementado 3 ejercicios para realizar la correcta integración y las pruebas de todo el sistema, sin embargo, nuevos ejercicios pueden ser incluidos de forma sencilla. Se ha logrado un sistema que mediante la WBB sensa el peso del cuerpo y consecuentemente es posible medir de manera directa el balance del cuerpo, propiedad que sólo puede

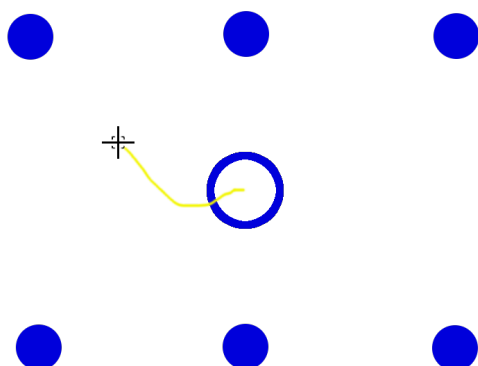


Figura 7. Representación del recorrido (a modo ilustrativo) hacia un objetivo del exergame de evaluación funcional

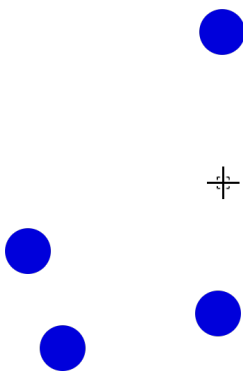


Figura 8. Exergame con el ejercicio de entrenamiento

aproximarse con dispositivos como Kinect. La utilización de una mini-PC resulta en un sistema más económico, flexible y transportable. Además, no requiere el mantenimiento de una PC tradicional y es más sencilla su re-instalación ante imprevistos. Una presentación sobre características y funcionalidades del sistema completo puede verse en <https://bit.ly/2LrkL8E>.

Mediante un subsidio recientemente otorgado por el Programa de Ingenieros del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de la Provincia de Santa Fe, se ha garantizado el avance del sistema hacia la etapa final de pruebas. La etapa restante consiste en la realización de pruebas en ejercicios con pacientes, el ajuste del sistema y la validación clínica del mismo. Las variables a registrar ya

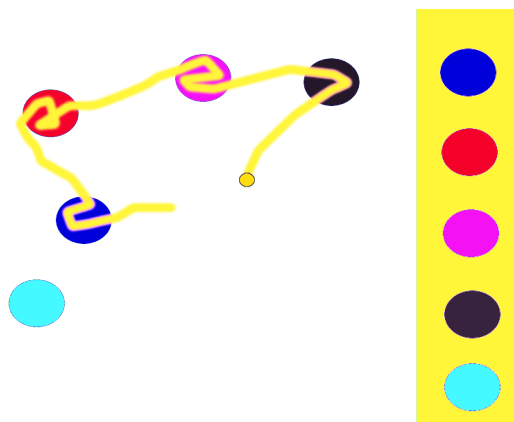


Figura 9. Representación del recorrido (a modo ilustrativo) por los objetivos del ejercicio con el ejercicio de entrenamiento (cognitivo).

se encuentran definidas: recorrido del paciente, tiempo en cumplir cada objetivo con la discriminación de los objetivos por su ubicación en cuadrantes, restando aún implementar el módulo de registro y estadísticas de la evolución del paciente.

Otro trabajo futuro que se llevará a cabo gracias al subsidio del Programa Ingenieros, es la integración con otro sensor utilizado en los videojuegos, llamado Kinect⁹. Este es un dispositivo de visión 3D que posee algoritmos de reconocimiento y seguimiento de siluetas humanas. Existen algunos desarrollos que utilizan en Kinect, como ser kinemotion¹⁰, sin embargo, estos sistemas funcionan en computadoras tradicionales. Si bien, el Kinect permite realizar una estimación de los cuerpos de las personas y aproximar el balance del cuerpo, los sensores de peso como la WBB son mucho más precisos. La idea de combinar estos dispositivos con una mini-pc destaca al sistema por sobre otros, ya que ambos dispositivos pueden utilizarse para rehabilitar las mismas enfermedades haciendo foco en ejercicios complementarios optimizando el uso de lo sensado por cada uno.

Referencias

1. J. J. Martin, "Benefits and barriers to physical activity for individuals with disabilities: a social-relational model of disability perspective," *Disability and rehabilitation*, vol. 35, no. 24, pp. 2030–2037, 2013.
2. W. Young, S. Ferguson, S. Brault, and C. Craig, "Assessing and training standing balance in older adults: a novel approach using the 'nintendo wii'balance board," *Gait & posture*, vol. 33, no. 2, pp. 303–305, 2011.

⁹ <https://developer.microsoft.com/en-us/windows/kinect>

¹⁰ <https://kinemotion.cl>

3. A. Estepa, S. S. Piriz, E. Albornoz, and C. Martínez, "Development of a kinect-based exergaming system for motor rehabilitation in neurological disorders," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 705, p. 012060, IOP Publishing, 2016.
4. M. D. Finco and R. W. Maass, "The history of exergames: promotion of exercise and active living through body interaction," in *2014 IEEE 3rd International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, pp. 1–6, IEEE, 2014.
5. J.-W. Hung, C.-X. Chou, Y.-W. Hsieh, W.-C. Wu, M.-Y. Yu, P.-C. Chen, H.-F. Chang, and S.-E. Ding, "Randomized comparison trial of balance training by using exergaming and conventional weight-shift therapy in patients with chronic stroke," *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 95, no. 9, pp. 1629–1637, 2014.
6. M. Agmon, C. K. Perry, E. Phelan, G. Demiris, and H. Q. Nguyen, "A pilot study of wii fit exergames to improve balance in older adults," *Journal of geriatric physical therapy*, vol. 34, no. 4, pp. 161–167, 2011.
7. S. Hanneton *et al.*, "Coaching the wii," in *2009 IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games*, pp. 54–57, IEEE, 2009.
8. R. A. Clark, A. L. Bryant, Y. Pua, P. McCrory, K. Bennell, and M. Hunt, "Validity and reliability of the nintendo wii balance board for assessment of standing balance," *Gait & posture*, vol. 31, no. 3, pp. 307–310, 2010.
9. "Wii Balance Board - WiiBrew, howpublished = http://wiibrew.org/wiki/wii_balance_board_note = *Accedido* : 2019 – 04 – 10."
10. R. A. Clark, B. F. Mentiplay, Y.-H. Pua, and K. J. Bower, "Reliability and validity of the wii balance board for assessment of standing balance: a systematic review," *Gait & posture*, vol. 61, pp. 40–54, 2018.
11. A. Mengarelli, F. Verdini, S. Cardarelli, F. Di Nardo, L. Burattini, and S. Fioretti, "Balance assessment during squatting exercise: A comparison between laboratory grade force plate and a commercial, low-cost device," *Journal of biomechanics*, vol. 71, pp. 264–270, 2018.
12. A. e. a. Srivastava, "Post-stroke balance training: role of force platform with visual feedback technique," *Journal of the Neurological Sciences*, vol. 287(1-2), pp. 89–93, 2009.
13. J. Sinclair, P. Hingston, and M. Masek, "Considerations for the design of exergame," in *Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia*, pp. 289–295, 2009.
14. S. Jackson and M. Csikszentmihalyi, *Flow in sports*. Human Kinetics, 1999.