

## Nuevo sistema robótico social de rehabilitación de pacientes pediátricos con parálisis cerebral

Mauro Tassinari-Lagos<sup>a-b,\*</sup>, Pablo Romero-Sorozábal<sup>b</sup>, Carlos Martín<sup>c</sup>, Dolores Blanco<sup>a</sup>, María Malfaz<sup>a</sup>, Eduardo Rocon<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Carlos III de Madrid, Avda. Universidad 30, 28911, Leganés, España.

<sup>b</sup> Centro de Automática y Robótica, CSIC-UPM, Ctra. M300 Campo Real, Km 0.200, 28500, Arganda del Rey, Madrid, España.

<sup>c</sup> Hospital Universitario Infantil Niño Jesús, Av. de Menéndez Pelayo, 65, 28009, Madrid, España.

**To cite this article:** Tassinari-Lagos, M., Romero-Sorozábal, P., Martín, C., Blanco, D., Malfaz, M., Rocon, E. 2023. New social robotic system for the rehabilitation of pediatric patients with cerebral palsy. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 20, 315-326. <https://doi.org/10.4995/riai.2023.18785>

### Resumen

La parálisis cerebral (PC) es la enfermedad motora más común en pacientes pediátricos, afectando su capacidad para moverse y mantener el balance corporal y la postura. Este estudio se enfoca en las terapias de rehabilitación robóticas, llevadas a cabo con la plataforma CPWalker, para la realización de ejercicios funcionales mediante movimientos precisos. El trabajo presentado en este artículo propone la integración de la robótica de asistencia social en el CPWalker a través del robot social NAO. De esta manera se plantea conseguir reforzar la motivación del paciente y el dinamismo de estas terapias, y automatizar la retroalimentación correctiva al paciente. El sistema propuesto ha sido evaluado en dos estudios: 1) se ha implementado un protocolo clínico de actividades y juegos entre NAO y los pacientes para evaluar la aceptación del robot por parte de los niños, y 2) se ha evaluado la integración del nuevo sistema robótico social de rehabilitación. Los resultados de este estudio indican que el robot funciona correctamente y es percibido positivamente por los pacientes.

**Palabras clave:** Parálisis Cerebral, robot NAO, CPWalker, Tecnología asistencial e ingeniería de rehabilitación, Robótica de asistencia social, EMG.

### New social robotic system for the rehabilitation of pediatric patients with cerebral palsy

#### Abstract

The most common motor disease in pediatric patients is cerebral palsy (CP), which affects their ability to move and maintain balance and posture. This study focuses on robotic rehabilitation therapies, carried out with the CPWalker platform, for the performance of functional exercises through precise movements. The work presented in this article proposes the integration of social assistance robotics in the CPWalker through the social robot NAO. In this way, it is proposed to reinforce patient motivation and the dynamism of these therapies, and to automate corrective feedback to the patient. The proposed system has been evaluated in two studies: 1) a clinical protocol of activities and games has been implemented between NAO and patients to assess the children's acceptance of the robot, and 2) the integration of the new social robotic rehabilitation system has been evaluated. The results of this study indicate that the robot works correctly and is perceived positively by the patients.

**Keywords:** Cerebral Palsy, NAO robot, CPWalker, Assistive technology and rehabilitation engineering, Socially assistive robotics, EMG.

## 1. Introducción

La parálisis cerebral (PC) afecta a 2 o 3 bebés de cada 1000 en el mundo, siendo la causa más común de discapacidad motora en la infancia (Sewell et al., 2014). La parálisis cerebral

es un trastorno del neurodesarrollo que abarca trastornos permanentes del movimiento y la postura los cuales producen alteraciones no progresivas en el cerebro infante o feto en desarrollo (Rosenbaum et al., 2007). Los pacientes diagnosticados con parálisis cerebral tienden a ser muy dependientes debido a su dificultad para moverse, lo cual

\*Autor para correspondencia: matassinari@gmail.com.

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

afecta su estado emocional y el de sus familiares, así como su calidad de vida (Meyer-Heim & van Hedel, 2013).

Actualmente no existe cura para la parálisis cerebral, pero sí terapias, tratamientos y procedimientos quirúrgicos que ayudan a mejorar la calidad de vida de estos pacientes. Generalmente, el objetivo de las terapias de rehabilitación es mejorar la movilidad del paciente y su habilidad de caminar, así como otorgarles independencia en su vida cotidiana en habilidades como jugar, comer, ducharse, etc. (Booth et al., 2018). Sin embargo, las terapias de rehabilitación convencionales tienden a ser muy laboriosas e intensivas, generando así grandes costes tanto para la sanidad como para los familiares de estos pacientes (Díaz et al., 2011). Por este motivo empezaron a surgir soluciones tecnológicas como las terapias de rehabilitación robóticas (Fasoli et al., 2012).

Las terapias robóticas complementan las terapias clásicas al permitir la realización de ejercicios funcionales con movimientos precisos en lugar de movimientos repetitivos sin ninguna meta específica (Bayón, 2018). Además, dependiendo del dispositivo, se puede aportar apoyo, tanto al paciente como al fisioterapeuta encargado, en aspectos que antes no se podía. Por ejemplo, aportar soporte parcial de peso corporal al paciente, ayudando así a aquellos que tienen debilidad muscular, y control sobre factores de la marcha como velocidad y longitud de paso. La principal limitación de esta aproximación es la motivación de los pacientes, ya que, tanto familiares como fisioterapeutas de pacientes pediátricos con PC valoran la motivación como la característica personal más importante que determina los resultados de mejoría motriz y funcional (Bartlett & Palisano, 2002; Law et al., 2009).

Este estudio plantea integrar el robot social NAO (SoftBank Robotics, 2022) a la plataforma robótica CPWalker (Bayón, 2018), la cual consiste en un exoesqueleto robótico, para la asistencia de la marcha, y un caminador inteligente con soporte parcial de peso corporal. El objetivo es crear un sistema que permita aumentar la motivación de los pacientes durante las terapias, permitiendo así evaluar el papel que puede jugar la robótica social en el marco de la robótica de rehabilitación. Para ello, utilizaremos el robot NAO como una herramienta de motivación durante las terapias de rehabilitación aplicadas por el CPWalker. Asimismo, NAO actuará como una herramienta que pueda apoyar a los fisioterapeutas encargados, otorgando retroalimentación en tiempo real sobre el progreso del paciente durante la terapia.

Este artículo presenta el diseño, desarrollo y evaluación técnica de este nuevo sistema robótico social de rehabilitación de pacientes pediátricos con parálisis cerebral. En la siguiente sección se introducen los componentes y arquitectura de control del sistema, así como el algoritmo de procesamiento de los datos cinemáticos y EMG. A continuación, se describe el estudio clínico de la evaluación de la aceptación del robot NAO, por parte de los sujetos de estudio, y los resultados obtenidos. Con estos resultados, se detalla la evaluación técnica de la plataforma y los resultados finales obtenidos de la integración completa del sistema.

## 2. Sistema robótico social de rehabilitación

Con el objetivo de mejorar la motivación de los pacientes durante las terapias, se ha decidido realizar la integración de la

Robótica de Asistencia Social (SAR) en el sistema. Algunos trabajos previos en los que se ha incorporado SAR en terapias de rehabilitación de pacientes pediátricos con PC indican que este tipo de robots son bien recibidos por los pacientes y que los mismos manifiestan su deseo de que dichos robots participen en sus terapias de rehabilitación.

Un ejemplo de esto, es el trabajo realizado con el robot “KineTron” (Kozyavkin et al., 2014), en el cual se realizaron una serie de juegos entre el robot y 6 pacientes con PC entre los 4 y 9 años de edad. Al finalizar las sesiones, los pacientes fueron entrevistados para conocer su satisfacción y opinión del robot, donde todos los pacientes indicaron que dicho robot les ha gustado y que desearían que el mismo participase en sus terapias de rehabilitación.

Existen otros estudios análogos realizados con el robot NAO que aportan un conocimiento sobre la recepción de estos robots por pacientes dentro de la categoría de este estudio. Un ejemplo destacable es la plataforma NAOTherapist (Pulido Pascual, 2020) donde se evalúa la implementación del robot NAO para la rehabilitación motora de los miembros superiores de pacientes pediátricos con PC y parálisis obstétrica del plexo braquial (OBPP). La evaluación fue realizada con 3 pacientes pediátricos, 2 con OBPP y 1 con PC, y 117 niños sanos estudiantes de 2 colegios. Estos pacientes realizaron una serie de actividades y ejercicios con los brazos, donde NAO, a través de una plataforma de reconocimiento visual con un sensor Kinect, detecta si el niño está realizando correctamente o no los movimientos y los corrige si es necesario. Previo a la realización de los ejercicios, los pacientes participaron en una sesión de introducción con el robot. La evaluación de las sesiones se realizó mediante un cuestionario, de satisfacción y opinión, el resultado del desempeño de los participantes en las actividades y mediante análisis de videos de las sesiones para la evaluación del comportamiento y actitud de los niños. Dentro de las conclusiones de esta validación, se destaca que los pacientes se encuentran altamente motivados durante las sesiones y con ánimos de seguir realizándolas. Además, los pacientes describen a NAO con adjetivos positivos como feliz, amoroso e inteligente, e indican que características como el comportamiento, la apariencia y los diálogos del robot aseguran su correcta presencia social entre los niños.

Destacamos también el estudio realizado en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Céspedes Gómez et al., 2021) en el cual se evalúa la recepción social del robot NAO y los efectos de la aplicación de la robótica social en pacientes pediátricos con PC. En dicha evaluación se realizó una sesión de introducción, entre los pacientes y el robot, y una serie de juegos con reconocimientos de partes del cuerpo y animales. La medición del nivel de interacción entre los niños y NAO se realizó mediante un análisis posterior de las sesiones grabadas para obtener el nivel de atención del paciente, el seguimiento de instrucciones y las actitudes hacia el robot. La validación se realizó con 10 niños con PC entre los 5 y 15 años de edad. Los resultados indican que los pacientes presentaron un elevado nivel de atención al robot durante las sesiones (superior al 70% del tiempo) y presentan actitudes en su mayoría positivas y neutras. Considerando estos resultados, se toma la decisión de implementar el robot NAO como componente motivador y rehabilitador durante las terapias de rehabilitación llevadas a cabo con el CPWalker (Figura 1).



Figura 1: Plataforma robótica CPWalker y robot NAO.

2.1. Definición del sistema

Tal y como se muestra en la Figura 1, el sistema robótico propuesto está compuesto por la plataforma robótica CPWalker, para la rehabilitación física de pacientes pediátricos con PC; sensores superficiales EMG, para el análisis de la actividad muscular del paciente; y el robot humanoide NAO. Este último con el fin poder otorgar retroalimentación en tiempo real correctiva a los pacientes, y para motivarles haciendo las terapias más divertidas y llamativas con el objetivo de aumentar el compromiso de estos pacientes de temprana edad. Para ello, se desarrolla un algoritmo de procesamiento de los datos cinemáticos del paciente en el CPWalker, respecto al plano sagital, en dos articulaciones (cadera y rodilla) y de señales EMG (Delsys Incorporated, 2022) y activaciones musculares de cuatro músculos de las piernas (tibial anterior, gemelo medial, recto femoral y semimembranoso, Figura 2).

Este algoritmo es capaz de predecir si el paciente va a realizar incorrectamente un movimiento para que NAO le indique que lo corrija. También podrá detectar si está realizando una activación de parejas de músculos de manera incorrecta o perjudicial para que el algoritmo lo notifique al fisioterapeuta, a través de una interfaz de usuario, para que este tome las medidas que considere necesarias. Además, el algoritmo indicaría a NAO cuando motivar al paciente a través de una retroalimentación auditiva y visual, es decir, mediante gestos y voz, a la frecuencia que el fisioterapeuta establezca.

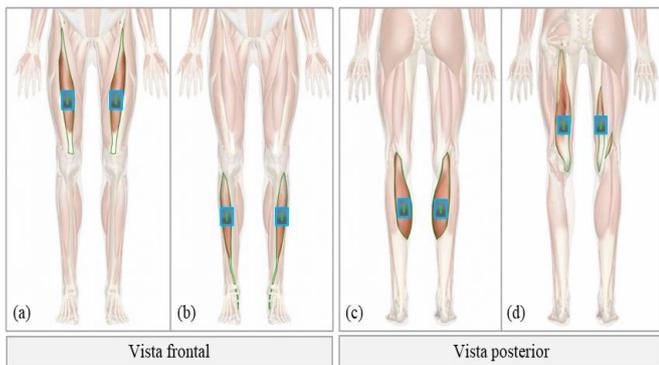


Figura 2: Músculos que analizar y ubicación aproximada de los 8 sensores EMG superficiales. (a) Recto Femoral; (b) Tibial Anterior; (c) Gemelo Medial; (d) Semimembranoso. Imágenes piernas de (Taylor, 2019).

2.2. Arquitectura de control

El control de los comportamientos de NAO se realiza gracias a un algoritmo de procesamiento, programado en Python, de los datos cinemáticos y EMG para la monitorización de los movimientos de las piernas del paciente y su actividad muscular durante la terapia. Para ello, se diseña la arquitectura de control que se puede observar en la Figura 3 que permite la comunicación de los diferentes componentes del sistema.

El ordenador del sistema recibe los datos cinemáticos del paciente en el CPWalker a través de internet mediante el protocolo UDP a una frecuencia de 100 Hz. Estos datos son el ángulo, según el plano sagital, de la cadera y rodilla de ambas piernas del paciente. Dichos datos se procesan en el ordenador para la activación de los comportamientos de NAO programados para cada caso (motivación y retroalimentación positiva y correctiva). NAO utiliza esta información para motivar, felicitar o corregir al paciente audiovisualmente.

El ordenador también posee una interfaz gráfica de usuario, para su utilización por el fisioterapeuta encargado de las terapias, con tres funciones principales relacionadas con el CPWalker: (1) controlar los parámetros de la terapia (rango de movimiento, velocidad de marcha, soporte parcial de peso corporal, entre otros), (2) representar gráficamente los datos cinemáticos del paciente y (3) controlar los parámetros de la retroalimentación otorgada por NAO (frecuencia de las motivaciones, articulación sobre la cual enfocar la retroalimentación y parámetros para el análisis de los datos, como la precisión requerida del paciente en los movimientos o tiempo de permanencia realizando incorrectamente un movimiento antes de ser corregido por NAO).

Los sensores EMG envían al ordenador, a través del protocolo UDP, los datos de la envolvente y activación muscular de los 4 músculos de cada pierna del paciente para su procesado. Si el algoritmo detecta alguno de los eventos que el fisioterapeuta desea monitorizar, se notifica al sanitario el evento ocurrido, mediante una interfaz gráfica, para que este tome las medidas necesarias. En este caso, la interfaz gráfica del ordenador permite al fisioterapeuta elegir qué tipo de evento muscular desea monitorizar o si desea monitorizar un músculo específico de los 8 analizados (4 para cada pierna).

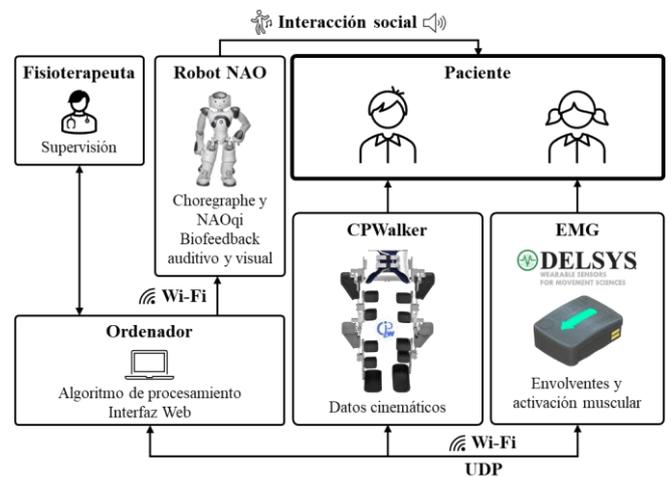


Figura 3: Arquitectura de control del sistema robótico social de rehabilitación.

### 2.3. Algoritmo de toma de decisiones

Hemos desarrollado un algoritmo que procesa en tiempo real los datos cinemáticos y activaciones musculares del paciente durante sus terapias. Este algoritmo es capaz de predecir si el paciente va a realizar correctamente o no los movimientos de la marcha mediante la comparación de los datos cinemáticos del paciente con datos de referencia definidos por el fisioterapeuta. Además, es capaz de detectar ciertos patrones de activaciones de parejas de músculos que pueden ser perjudiciales para el paciente.

#### 2.3.1. Análisis cinemático

Este algoritmo de procesamiento se encarga de analizar el movimiento de las rodillas y caderas del paciente en los momentos más cruciales de la marcha. Concretamente, se monitoriza la flexión de las rodillas, y la flexión y extensión de las caderas.

Para determinar si el paciente está realizando correctamente o no los movimientos de las articulaciones durante la marcha, se comparan los datos cinemáticos del paciente con datos de referencia de pacientes sanos (Vallery et al., 2009). Para la adaptación de la referencia, el fisioterapeuta puede modificar la amplitud del perfil angular de referencia modificando así los ángulos de flexión y extensión máximos que debe alcanzar el paciente. Además, el fisioterapeuta puede establecer un rango, o umbral, de aceptación de la cinemática del paciente, lo cual modifica el nivel de precisión que debe tener al realizar los movimientos de cada articulación. Este parámetro se puede modificar a medida que avanzan las sesiones, para aumentar la exigencia hacia el paciente y, por ende, su mejoría.

En la Figura 4 se observa una representación de una curva de referencia y el rango de aceptación que el paciente debe seguir. En el recuadro rojo se señala el ángulo máximo de flexión de la rodilla derecha que el paciente debe alcanzar para realizar correctamente la terapia, manteniendo la flexión de su rodilla siempre dentro del rango de aceptación.

Para la cadera, las condiciones son similares, excepto por la diferencia en la curva de referencia y que, para este estudio, no solo se monitoriza la flexión, sino también la extensión de la articulación.

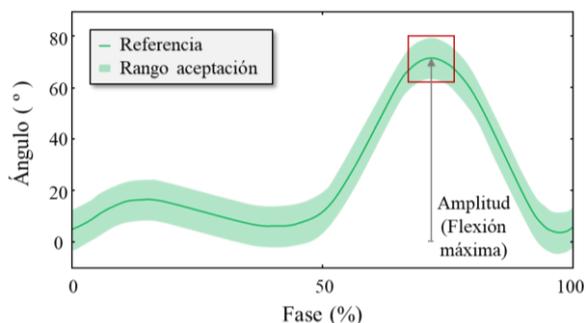


Figura 4: Curva de referencia y rango de aceptación ejemplos para la cinemática de la rodilla derecha.

En la Figura 5 se representa un ejemplo de la curva de referencia y rango de aceptación para la flexión y extensión de cadera. En el recuadro rojo, de igual manera que para la rodilla, se señala el ángulo máximo ideal que el paciente debe alcanzar en la flexión de la cadera. En el recuadro azul se señala el ángulo máximo ideal en la extensión de cadera, sin embargo,

dado que la mayoría de las personas con PC tienden a una menor extensión de la cadera que los parámetros habituales, en este estudio no se considera un movimiento incorrecto o perjudicial una mayor extensión que la definida en el rango permitido. En la fase de extensión de cadera solo se monitoriza que la extensión de la cadera sea menor de lo indicado en la referencia.

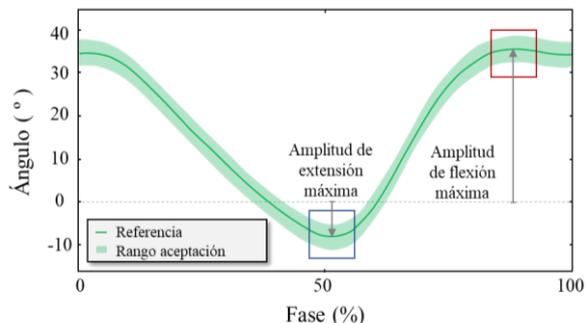


Figura 5: Curva de referencia y rango de aceptación ejemplos para la cinemática de la cadera derecha.

El procesamiento de los datos cinemáticos se realiza mediante el modelo de ventanas temporales para evitar el tratamiento de grandes cantidades de datos, evitando así ralentizar el procesamiento y conseguir un desempeño en tiempo real. Es de gran importancia para este estudio que los datos se procesen en tiempo real, para que el robot NAO pueda dar la retroalimentación a los pacientes lo más rápido posible y sin retraso. De esta manera, el paciente es capaz de captar exactamente en qué momento de la marcha está realizando incorrectamente los movimientos para poder corregirlos progresivamente. Para este estudio, se trabaja con ventanas de tamaño configurable por el fisioterapeuta, pero con un valor por defecto de 10% de fase de marcha y con una actualización de datos cada 0.5% de fase. Es decir, la ventana tiene una duración temporal correspondiente a un 10% de la duración de un ciclo de marcha, actualizándose los datos cada 0,5% de la fase de avance del paciente durante la terapia y descartándose los datos más antiguos.

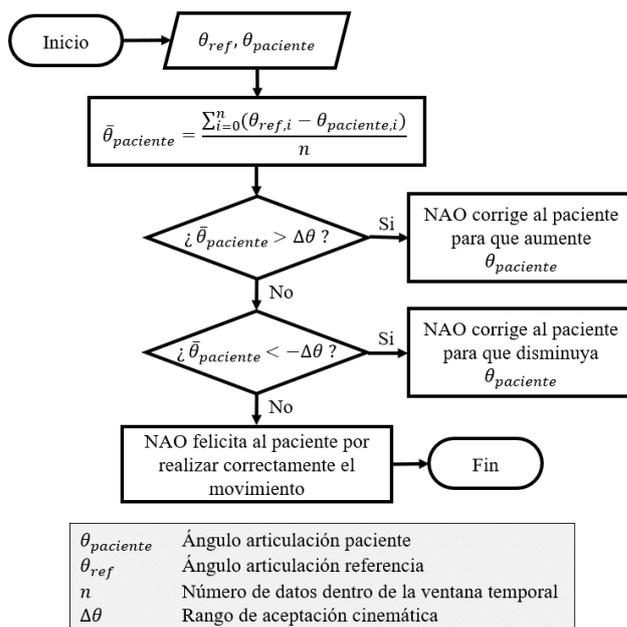


Figura 6: Diagrama de flujo algoritmo procesamiento datos cinemáticos.

Como se puede observar en la Figura 6, la predicción del desempeño del paciente en cada paso de la marcha se realiza calculando la media de la diferencia ( $\theta_{paciente}$ ) entre la cinemática de referencia para cada articulación ( $\theta_{paciente}$ ) y la cinemática real del paciente ( $\theta_{ref}$ ). De esta manera, si el valor de esta media se encuentra fuera del rango de aceptación establecido, se considera que el paciente está realizando incorrectamente el movimiento de la articulación analizada y, por ende, el robot NAO tendría que corregirle. Si, por el contrario, la media se encuentra dentro del rango, el paciente está realizando correctamente el movimiento y NAO tendría que felicitarle. Cualquiera de las dos situaciones debe ocurrir durante un tiempo determinado por el fisioterapeuta, para evitar la influencia de ruidos en los sensores y permitir que el algoritmo se asegure de que realmente el paciente está realizando el movimiento correcta o incorrectamente.

La Figura 7 ilustra una representación del funcionamiento del algoritmo de procesamiento para los datos cinemáticos. En la ventana temporal se calcula la media de las diferencias (flechas rojas) entre los datos de referencia (curva verde) y los del paciente (curva azul). En este ejemplo, visualmente se puede observar que el paciente no va a alcanzar la flexión máxima de rodilla dentro del rango de aceptación. Pero, el algoritmo también llega a esa conclusión mediante el procesamiento de estos datos para la predicción de los movimientos del paciente. Si esta condición se mantiene durante 50ms, periodo de tiempo establecido para este estudio, se enviaría un comando al robot NAO para que corrija al paciente mediante un comportamiento. En este caso, NAO le diría al paciente que flexione más la rodilla, mientras levanta el brazo derecho, para que llegue a la flexión máxima. La animación de NAO para dicha retroalimentación tiene una duración determinada que depende del movimiento a corregir. Al finalizar la animación, NAO regresa a un estado neutro posicionado en postura recta y con los brazos bajados, asemejando un comportamiento humano en reposo. Es importante destacar que la plataforma CPWalker no corrige los movimientos del paciente, sino que guía la marcha del mismo según la referencia cinemática con distintos grados de apoyo variando la fuerza ejercida sobre las piernas del paciente.

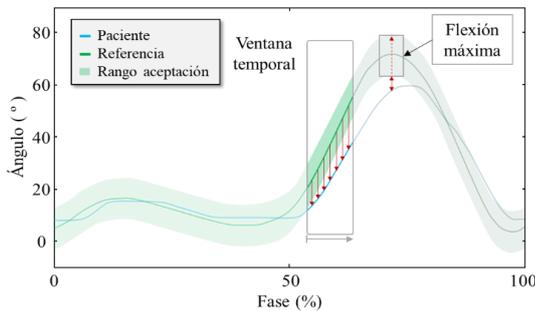


Figura 7: Ejemplo de procesamiento de datos cinemáticos (cinemática rodilla derecha).

### 2.3.2. Análisis datos de electromiografía

Para el análisis de las activaciones musculares del paciente se ha monitorizado la aparición de cocontracciones prolongadas, las cuales son activaciones simultáneas de músculos opuestos, o antagonistas, que cruzan una articulación (Gardinier, 2009). En este estudio se monitorizarán 2

cocontracciones, la cocontracción superior, causada por la activación simultánea y prolongada del recto femoral y semimembranoso, y la cocontracción inferior, causada por la activación del tibial anterior y gemelo medial. Siendo estos, según indicaciones de los sanitarios colaboradores, los únicos patrones de activación muscular de interés para este estudio.

En la Figura 8 se representa un ejemplo de la actividad muscular de los 4 músculos a analizar de la pierna izquierda de un paciente ejemplo con PC. Se pueden observar las activaciones musculares de referencia, es decir, los momentos de la fase de marcha en los que estos músculos deberían activarse, como las líneas negras más gruesas en el eje horizontal de cada gráfica de la Figura 8. Cabe destacar que la plataforma CPWalker posee un algoritmo de procesamiento que calcula las activaciones en el tiempo de cada músculo analizado según las recomendaciones de los fisioterapeutas involucrados. En este trabajo, se comparan las referencias de activación, otorgadas por los fisioterapeutas encargados, con los datos reales del paciente otorgados por los sensores EMG y el algoritmo de procesamiento EMG del CPWalker. Además, se puede observar en la Figura 8, señalado en un recuadro morado, la detección de una cocontracción prolongada superior, la cual ocurre por la activación del recto femoral y semimembranoso durante un 20% de la fase de marcha, es decir, durante un tiempo lo suficientemente amplio como para ser clasificado incorrecto.

El segundo evento por monitorizar es la activación simultánea del gemelo medial y el semimembranoso durante la fase de extensión máxima de la rodilla, o balanceo final (entre el 60 y 80% de la fase de marcha). La mayoría de los pacientes con PC presentan espasticidad, el cual es un fenómeno que se presenta como una actividad muscular involuntaria inapropiada, o como una resistencia aumentada al estiramiento muscular pasivo dependiente de la velocidad (Shamsoddini et al., 2014). En los pacientes pediátricos con PC, la espasticidad durante la marcha contribuye a la reducción de la dorsiflexión del tobillo y la extensión de la rodilla en el balanceo final. Este estudio solo se enfocará en la reducción o impedimento de la extensión de rodilla, la cual está asociada con la activación simultánea del gemelo medial y el semimembranoso durante la fase de balanceo final. En la Figura 8 se puede observar, resaltado en un recuadro naranja, la aparición de este evento en la marcha de este paciente ejemplo. En las referencias de las activaciones musculares se puede observar que estos dos músculos (gemelo medial y semimembranoso) no deben activarse simultáneamente durante el 60 y 80% de la fase de marcha.

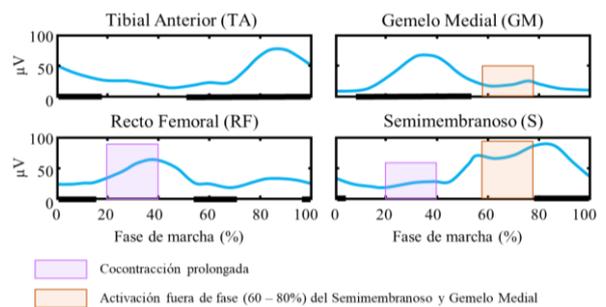


Figura 8: Señales de electromiografía de pierna izquierda de un paciente con PC (curvas azules) y activaciones musculares de referencia (líneas gruesas en eje horizontal). Representación de cocontracción superior y activación simultánea de GM y S fuera de fase.

Cuando el algoritmo detecta uno de estos comportamientos anómalos o eventos EMG, se le notifica al fisioterapeuta del mismo, a través de la interfaz gráfica de usuario. Los fisioterapeutas son los que, con esta información, deciden los cambios en la terapia. Como decisión en conjunto con los fisioterapeutas involucrados, NAO no está implicado en estas notificaciones ya que es más complicado que el paciente entienda un problema en las activaciones musculares de sus piernas a través de diálogos preprogramados con NAO. Por lo tanto, la corrección a estos eventos será notificada al paciente por el fisioterapeuta encargado.

### 3. Evaluación de la aceptación social de NAO

Para el correcto diseño y desarrollo del nuevo sistema social de rehabilitación, se ha decidido realizar primero una evaluación de la interacción humano-robot (HRI) entre los sujetos de estudio, pacientes pediátricos con PC, y el robot NAO. De esta manera se consigue una evaluación y validación de la aceptación del robot por parte de los pacientes.

Los objetivos de esta validación son valorar si los pacientes entienden las instrucciones otorgadas por el robot y su nivel de compromiso hacia las mismas, así como la motivación, satisfacción y desempeño de los usuarios durante las sesiones. Para ello, se diseña y lleva a cabo un protocolo clínico de aceptación social, el cual consiste en 5 actividades de las cuales 4 son actividades o juegos entre el robot y el paciente.

El desarrollo de las sesiones se realizará mediante una interfaz gráfica de usuario desarrollada en Python mediante PyQt, con los comportamientos de NAO integrados. La evaluación de la HRI se realizará mediante un sistema de calificación global del paciente durante las actividades, un cuestionario de satisfacción del paciente sobre el robot y un análisis de videos de las sesiones para el control de las actitudes del paciente durante las actividades.

#### 3.1. Criterios de inclusión y exclusión

Las sesiones se llevarán a cabo con pacientes pediátricos, entre 4 y 18 años, diagnosticados con PC sin deterioro cognitivo significativo o déficit de audición y visión. Los pacientes deben ser capaces de entablar una conversación para poder interactuar correctamente con el robot, y ser capaces de reconocer partes del cuerpo y animales.

#### 3.2. Escenario experimental

Este protocolo se llevará a cabo en una sala de rehabilitación del Hospital Niño Jesús de Madrid en España (Comunidad de Madrid, 2022). El paciente debe de colocarse de pie o sentado frente al robot para poder capturar correctamente sus movimientos, y a una separación aproximada de 2 metros para otorgar al paciente un espacio personal y seguro, evitando así que se asuste con los movimientos del robot. Cada sesión es individual para evitar intimidación de otros niños o incomodidad. Los participantes de la sesión son el paciente, el robot NAO, el operador de la interfaz, un fisioterapeuta y/o terapeuta ocupacional para supervisar el desarrollo de las sesiones, y los familiares de los pacientes si estos y el paciente lo desean (ver Figura 9).

Todas las sesiones fueron grabadas, con autorización previa del paciente y sus representantes, para poder evaluar posteriormente la calidad y desempeño de la sesión, así como las actitudes del paciente durante la misma.

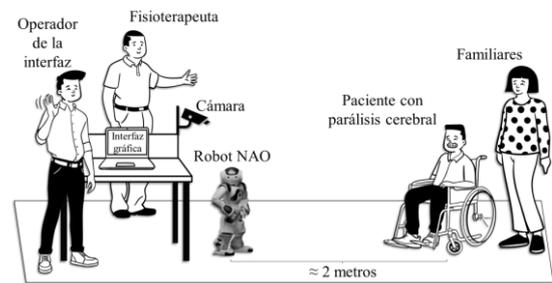


Figura 9: Escenario experimental del protocolo clínico de evaluación de la aceptación social del robot NAO.

#### 3.3. Intervención

1. **Introducción paciente-robot:** el robot NAO se presenta y le pregunta al paciente su nombre, edad y actividad favorita, dando primero el robot esta información mediante animaciones y diálogos. Esta actividad tiene como objetivo entablar un interés sobre el robot, por parte del paciente, y demostrar las habilidades que posee NAO.
2. **Identificación partes del cuerpo:** juego de mímica en el que NAO mueve una extremidad de su cuerpo, y le pide al paciente que mueva o señale esta misma extremidad. Las extremidades para identificar son la cabeza, los brazos y las piernas. El paciente debe realizar la identificación en espejo para evitar problemas con el reconocimiento de la lateralidad.
3. **Identificación de animales:** juego en el que NAO imita, mediante gestos y sonidos, 4 animales (gorila, pájaro, roedor y elefante) y el paciente debe identificar o imitar al animal en cuestión.
4. **Despedida:** una vez terminados los 3 juegos, NAO procede a felicitar al paciente por su esfuerzo y a despedirse del mismo amigablemente.
5. **Cuestionario:** preguntas al paciente para obtener su opinión sobre NAO en términos de movimientos, diálogos, luces y el nivel de humanización otorgado al robot. Además, se obtiene su opinión sobre la sesión y su desarrollo, así como su estado de ánimo durante la misma, mediante preguntas sencillas y específicas para evitar que el paciente se confunda y se le dificulte responder. Previo a realizar esta actividad, el robot debe ser retirado de la sala para evitar que la presencia del robot intimide al paciente e inflencie sus respuestas. Las respuestas de los pacientes en el cuestionario se analizarán en 3 partes, primero las preguntas de respuesta binaria, luego las de respuesta abierta y, finalmente, las de la serie Godspeed (Bartneck et al., 2009; Pulido et al., 2017). Las preguntas de este cuestionario se encuentran detalladas en la Tabla 1.

#### 3.4. Evaluación HRI

Además del cuestionario detallado anteriormente, se diseñan otros 2 métodos para la evaluación de la interacción social entre los pacientes y el robot NAO.

Tabla 1: Cuestionario de evaluación de aceptación social del robot NAO.

<b>Preguntas de respuesta binaria</b>	
Respuestas válidas: <u>sí</u> o <u>no</u>	
P1	¿Has entendido bien a NAO?
P2	¿Te fue fácil imitar a NAO?
P3	¿Te gustaría tener a NAO como amigo?
P4	¿Crees que NAO es feliz?
P5	¿Crees que NAO fue amigable?
P6	¿Crees que NAO habla mucho?
P7	¿Te gustaría llevarte a NAO a tu casa?
P8	¿Te gustaría que NAO te ayudara en tus tratamientos en el hospital?
P9	¿Te parece que NAO fue estricto?
P10	¿Los colores de los ojos de NAO te parecieron guay?
P11	¿Crees que la presentación de NAO fue muy rápida?
P12	¿Te divertiste con NAO?
<b>Preguntas de respuesta abierta</b>	
Respuestas válidas: <u>cualquiera</u>	
P13	Si NAO tuviese un hermanito, ¿qué nombre le pondrías?
P14	¿Qué edad crees que tiene NAO?
P15	¿Qué otros juegos te gustaría jugar con NAO?
<b>Preguntas Godspeed adaptadas</b>	
Respuestas válidas: <u>sí</u> , <u>más</u> o <u>menos</u> , <u>no</u> o <u>no responde</u> .	
G1. Antropomorfismo	
G1.1	¿Te parece que NAO tiene aspecto humano?
G2. Expresión de vida	
¿NAO te ha parecido ...	
G2.1	... vivaz?
G2.2	... impaciente?
G2.3	... alegre?
G2.4	... interactivo?
G2.5	... atento?
G3. Simpatía	
¿Cuál es su opinión del robot en los siguientes aspectos?	
G3.1	¿Te ha gustado?
G3.2	¿Cariñoso?
G3.3	¿Amigable?
G3.4	¿Agradable?
G3.5	¿Bonito?
G4. Inteligencia percibida	
G4.1	¿Crees que NAO es inteligente?
G5. Seguridad percibida	
¿Durante la sesión te has sentido ...	
G5.1	... relajado?
G5.2	... sorprendido?

### 3.4.1. Calificación por actividad

Para evaluar, y cuantificar, la correcta recepción de las instrucciones de NAO por parte de los pacientes, se asigna una puntuación máxima a cada una de las 3 primeras actividades de este protocolo dependiendo del peso de la actividad y del número de oportunidades que se dan al usuario para acertar. La calificación máxima que puede obtener el paciente es de 28 puntos.

En la primera actividad, el paciente puede obtener una calificación máxima de 1 punto si indica correctamente su nombre y edad en la primera oportunidad. En la segunda actividad, el paciente puede obtener una calificación máxima de 15 puntos en total, es decir, 3 puntos por cada extremidad si mueve o señala la extremidad en cuestión en la primera oportunidad. Si después de 3 oportunidades no responde, o no lo realiza correctamente, obtiene 0 puntos. Para la tercera actividad, el sistema de calificación es el mismo que para la anterior solo que con la identificación o imitación de los animales.

### 3.4.2. Análisis de videos

Se analizan los videos mediante la herramienta ELAN (Max Planck Institute for Psycholinguistics, The Language Archive, 2022) para el análisis cuantitativo, en función del tiempo, de ciertos eventos ocurrentes durante la sesión. Para este estudio se analizarán 5 eventos: (1) el nivel de atención del paciente sobre el robot; (2) el porcentaje de tiempo en que el paciente presenta actitudes positivas hacia el robot mediante expresiones faciales, corporales o verbales; (3) el porcentaje de tiempo que el paciente presenta actitudes negativas hacia el robot; (4) porcentaje de tiempo en que el paciente interactúa con el robot; y (5) porcentaje de tiempo en que el robot interactúa con el paciente.

### 3.5. Resultados obtenidos

Este protocolo ha sido validado experimentalmente con 9 pacientes del Hospital Niño Jesús de Madrid entre los 5 y 17 años de edad ( $12,55 \pm 4,53$ ), de los cuales 6 están diagnosticados con PC, y los otros 3 están diagnosticados con artrogriposis, espina bífida y tumor de fosa posterior.

Cabe destacar, que hubo un fallo técnico durante 3 sesiones, impidiendo la realización de la subtarea de identificar al gorila. Para conseguir resultados válidos y homogéneos, se ha decidido eliminar esta actividad de esta valoración.

Los resultados indican que los pacientes han realizado correctamente la mayoría de las actividades en la primera oportunidad y, por lo tanto, han entendido correctamente las explicaciones y directrices otorgadas por el robot NAO. Estos resultados indican que aspectos técnicos como la programación de los comportamientos y el volumen del sonido emitido por el robot han sido configurados correctamente.

En cuanto a los resultados del cuestionario, todos los pacientes han indicado que (Figura 10): han entendido bien a NAO (P1), es fácil imitarle (P2), que les gustaría tenerle como amigo (P3), que es feliz (P4) y amigable (P5), que les gustaría tener un robot como NAO en casa (P7) y como ayudante en sus tratamientos (P8), que les ha gustado los ojos del robot (P10) y que se han divertido durante la sesión con NAO (P12).

La mayoría de los pacientes creen que NAO no ha sido estricto con ellos (P9) y que la velocidad de las tareas fue la correcta (P11). Sin embargo, una gran parte de los pacientes opina que NAO habla mucho (P6). Estos resultados ya indican que la programación y humanización del robot ha sido correcta, excepto por el exceso de verbosidad de NAO, lo cual se tendrá en cuenta para el desarrollo del sistema de rehabilitación.

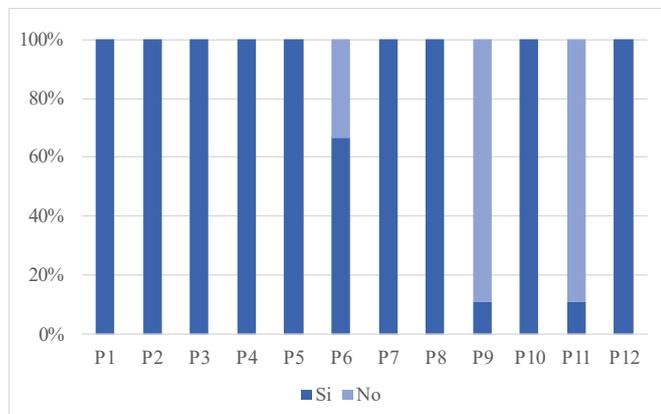


Figura 10: Resultados del cuestionario - Preguntas de respuesta binaria (P1 - P12).

Para expandir la primera aproximación de la interacción humano-robot, se tienen los resultados de las preguntas abiertas. El 78% de los pacientes le ha asignado al hermanito de NAO un nombre de humano. Los pacientes han indicado creer que NAO tiene una edad de  $9 \pm 4$  años, siendo esta la edad de un niño, al igual que ellos. El 89% de los pacientes ha indicado que les gustaría jugar con NAO en actividades donde los participantes son considerados humanos, por lo que le otorgan a NAO la capacidad humana de jugar con ellos y le consideran en su círculo de amistades.

Y, por último, se tienen los resultados de la serie Godspeed, para obtener la opinión directa de los pacientes sobre el robot, ver Figura 11.

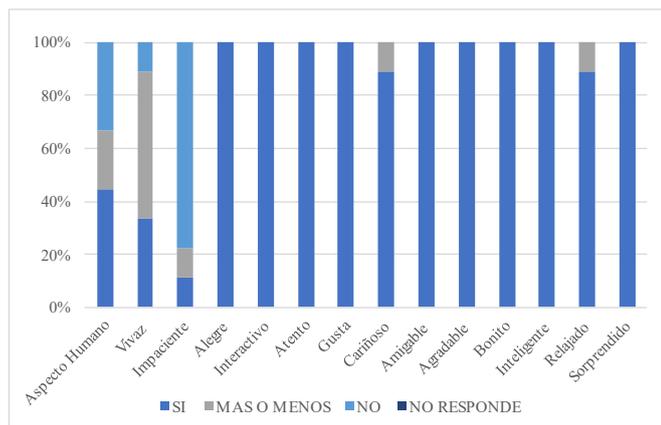


Figura 11: Resultados del cuestionario - Preguntas serie Godspeed (G1 - G5).

Según estos últimos resultados, los pacientes perciben positivamente al robot con aspectos positivos como alegre, atento y amigable, y con un elevado índice de humanidad. Algo muy importante a destacar, es que la mayoría de los pacientes se han sentido relajados (G5.1) y sorprendidos (G5.2) durante las sesiones, lo que indica que no han sentido miedo ni inseguridad.

Gracias a los resultados de este protocolo, se puede realizar la integración del robot NAO en las terapias con el CPWalker de manera más asertiva y precisa, tomando en cuenta las valoraciones de los pacientes para adaptar el sistema robótico a estos.

#### 4. Validación técnica del sistema de rehabilitación

Una vez se poseen los resultados de la aceptación social de NAO y los comentarios otorgados por los pacientes, se procede a realizar la integración técnica del sistema, teniendo en cuenta estos últimos resultados para la programación de los comportamientos del robot NAO, pudiendo así realizar la validación técnica de la misma.

La motivación del paciente se puede configurar como un intervalo de frecuencia. Por ejemplo, si dicho intervalo es de 1:2, NAO otorgará al paciente retroalimentación correctiva en un paso y de motivación durante los dos siguientes pasos. La retroalimentación al paciente se otorga en 2 fases, las cuales son:

- **Fase de retroalimentación correctiva:** durante los pasos de esta fase, si el algoritmo detecta que el paciente va a realizar incorrectamente un movimiento, NAO procede a corregirle indicándole qué debe realizar para conseguirlo. En cambio, si el paciente realiza correctamente el movimiento, NAO procede a felicitarle para motivar al paciente y permitirle que identifique qué movimiento ha realizado correctamente e intente repetirlo para mejorar su marcha.
- **Fase de motivación:** durante los pasos destinados a motivar al paciente, NAO tendrá predeterminado motivar al paciente mediante diálogos que le animen a seguir realizando la terapia y esforzarse durante la misma. Pero, si el paciente realiza correctamente un movimiento durante estos pasos, el algoritmo le da prioridad a felicitar al paciente antes que motivarle, para que el paciente pueda identificar el movimiento que ha hecho e intentar repetirlo.

##### 4.1. Validación técnica mediante simulación de terapias

Para realizar cómodamente la integración de NAO al sistema robótico, se ha diseñado una simulación de terapias de rehabilitación realizadas con el CPWalker y sensores de EMG en Simulink. Este simulador utiliza datos reales de terapias previamente realizadas con niños con PC en el Hospital Niño Jesús de Madrid, y simula el envío de los datos en tiempo real a la misma frecuencia que lo realiza el CPWalker y los sensores.

La validación del análisis cinemático del sistema se realiza mediante una simulación de los datos monitorizando la cinemática de la rodilla y cadera derecha del paciente. En esta validación se ha establecido un intervalo entre retroalimentación y motivación al paciente de 1:1, es decir, NAO da retroalimentación en los pasos impares del paciente, y motivación en los pasos pares. Para esta validación, se han establecido los parámetros de decisión, para el algoritmo de procesamiento, que se reflejan en la Tabla 2. Estos parámetros de decisión han sido fijados en conjunto con los fisioterapeutas colaboradores en el estudio.

Tabla 2: Parámetros de decisión del algoritmo de procesamiento – Validación mediante simulación del análisis cinemático.

Parámetro	Flexión rodilla	Flexión cadera	Extensión cadera
Ancho ventana temporal [ % fase de marcha ]	10	10	10
Rango de aceptación [ ° plano sagital ]	± 8	± 3	± 2
Tiempo mínimo de duración del evento para decidir dar retroalimentación [ ms ]	50	80	80
Rango de análisis* [ % fase de marcha ]	[51 – 79]	[70 – 100]	[42 – 60]

\* Se ha decidido limitar el rango de la fase de marcha, para el procesamiento de los datos cinemáticos, para evitar ralentizar el rendimiento del algoritmo innecesariamente. Estos rangos son aquellos donde los eventos principales a monitorizar ocurren.

La Figura 12 ilustra la representación gráfica de la simulación de la terapia enfocada en la cinemática de la rodilla derecha. La elipse negra señala el momento en el que el paciente está flexionando muy poco la rodilla, encontrándose por debajo del rango de aceptación, y el algoritmo detecta que el paciente va a seguir realizando incorrectamente el movimiento. Cuando se detecta este evento, NAO reacciona correctamente corrigiendo al paciente indicándole que flexione más la rodilla derecha.

El tiempo de respuesta de NAO es el adecuado para que el paciente tenga tiempo de corregir la flexión de la rodilla. Como en el segundo paso el paciente no estaba realizando correctamente la flexión de rodilla, NAO no debía felicitarle por hacerlo correctamente, por lo que NAO le ha motivado. En

la figura se puede apreciar que NAO motiva al paciente aproximadamente a la mitad del paso siguiente al de otorgarle la retroalimentación ( $t = 20.8s$ ). Cabe destacar, que la activación del comportamiento de motivación de NAO no está sujeta a los resultados del desempeño del paciente, ya que esta existe para motivar al paciente a seguir realizando la terapia con el mejor ánimo posible. El tiempo en el que NAO motiva al paciente es un poco antes de la mitad de la fase de marcha para que el robot pueda ejecutar el comportamiento antes de que el paso que este realizando el paciente finalice.

Esta validación también se ha comprobado para el análisis cinemático de las demás articulaciones, mediante varias simulaciones, y el desempeño de la plataforma es igualmente correcto, véase Figura 13. En este caso, se observa también que el paso N°2 era el designado para que NAO diera motivación al paciente, pero como este ha realizado correctamente el movimiento monitorizado, se ha dado prioridad a felicitar al paciente antes de motivarlo.

Una vez realizada la validación del sistema para el análisis cinemático, se procede a realizar la validación del análisis de las activaciones musculares del paciente. Para ello, se comprueba que el algoritmo detecte los 3 eventos a monitorizar, y envíe los avisos correspondientes al fisioterapeuta en tiempo real. Se establece un ancho de ventana temporal de un 10% de fase de marcha, y un mínimo de tiempo de duración del evento para dar una retroalimentación correspondiente al 3% de la fase de marcha. El algoritmo identifica correctamente las cocontracciones tanto superiores como inferiores. El tiempo de respuesta de la interfaz es prácticamente inmediato, justo 3% de la fase de marcha después que se identifica la cocontracción se envía la notificación al fisioterapeuta de la detección de la cocontracción, véase Figura 14.

El siguiente paso fue comprobar si el algoritmo funciona igual de bien con la detección de un impedimento de la extensión de rodilla. Para ello se busca, en la actividad muscular del paciente, una activación simultánea del Semimembranoso y Gemelo Medial durante el 60 y 80% de la fase de marcha. El algoritmo ha detectado correctamente este evento, y ha notificado también rápidamente al fisioterapeuta la situación, véase Figura 15.

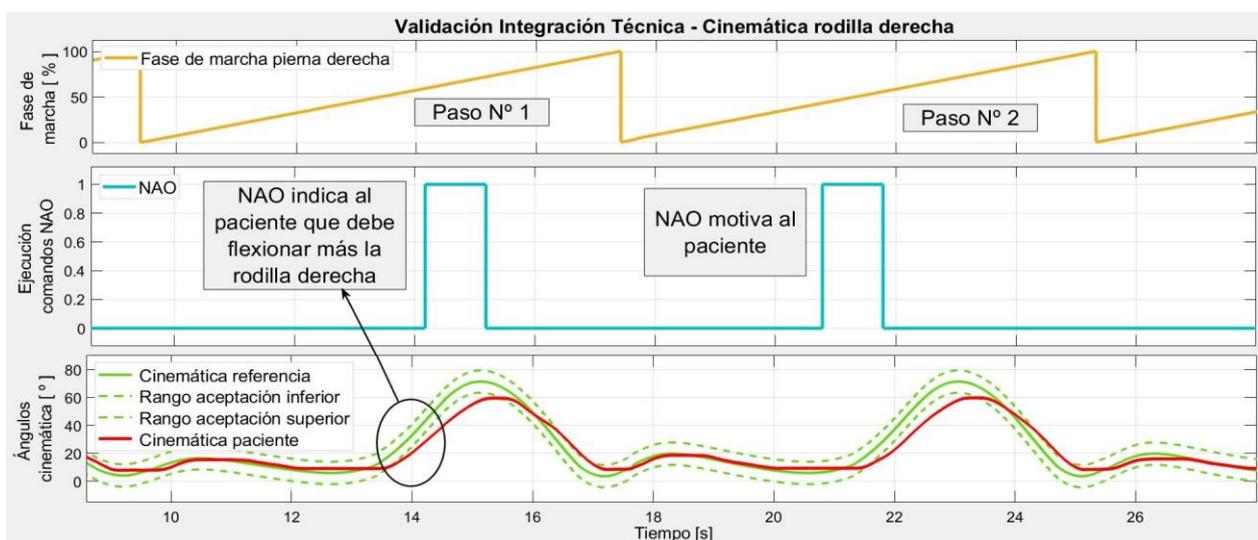


Figura 12: Validación técnica del sistema robótico mediante simulación – Análisis cinemático rodilla derecha.

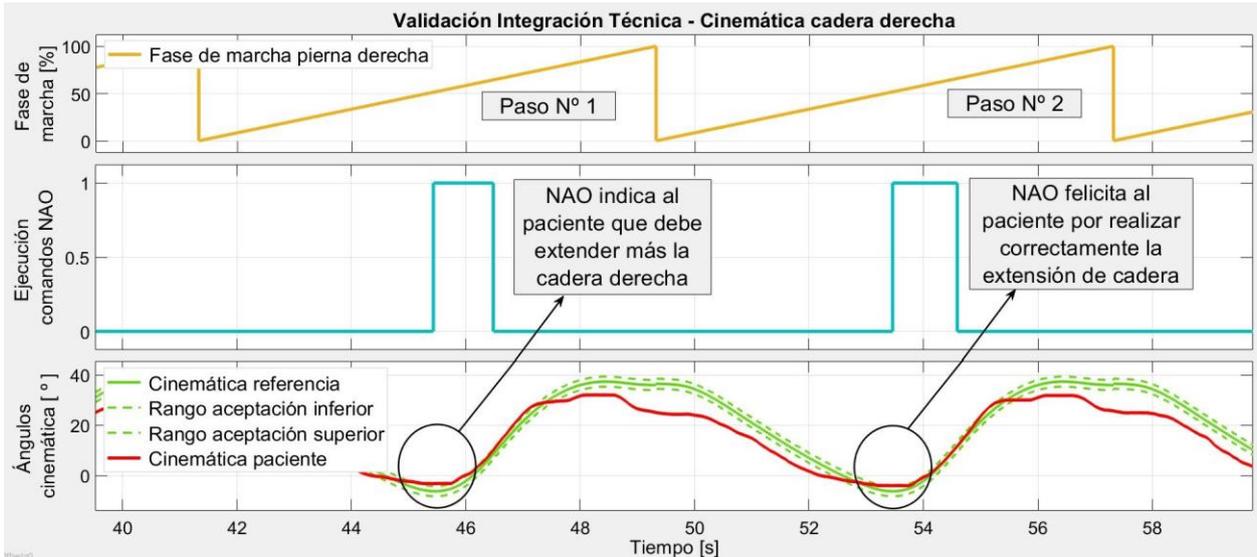


Figura 13: Validación técnica del sistema robótico mediante simulación – Análisis cinemático cadera derecha.

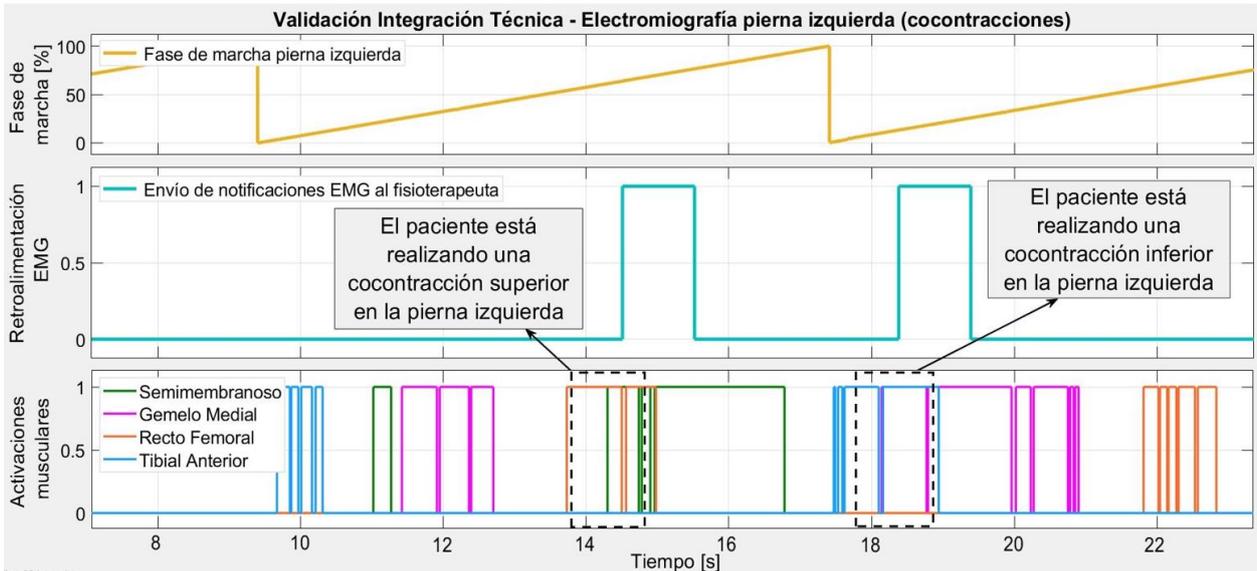


Figura 14: Validación técnica del sistema mediante simulación – Análisis de activaciones musculares (cocontracciones).

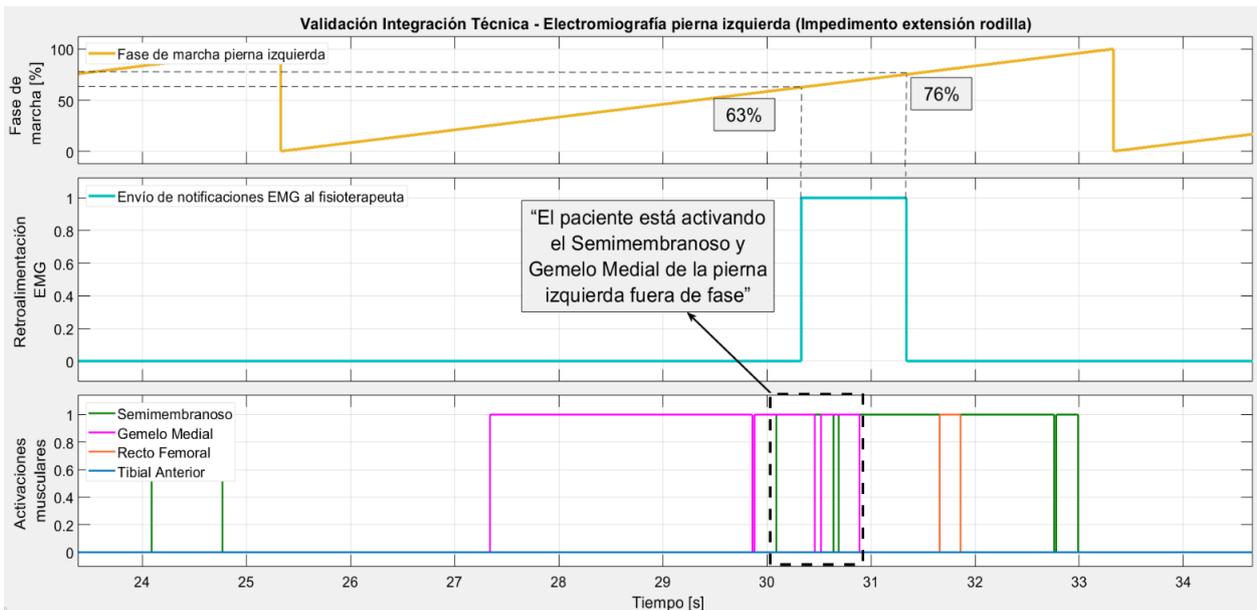


Figura 15: Validación técnica del sistema mediante simulación – Análisis de activaciones musculares (impedimento extensión rodilla).

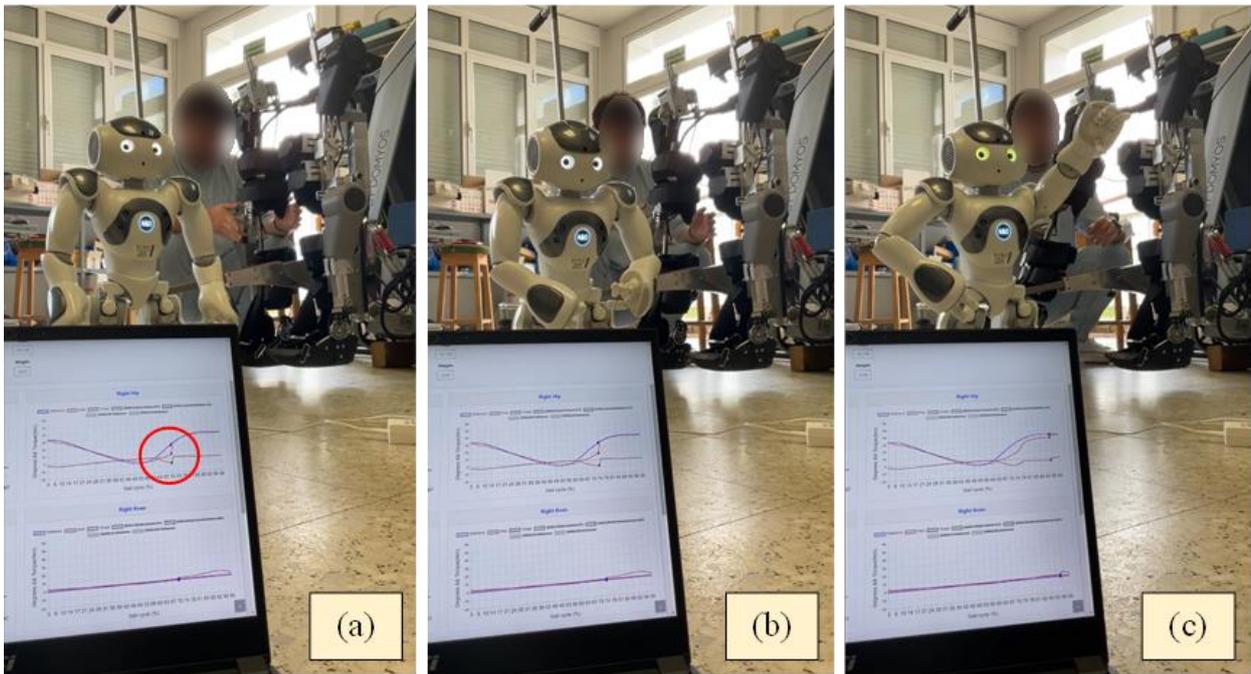


Figura 16: Validación técnica del sistema con el CPWalker – Flexión cadera derecha. (a) Momento en el que el algoritmo detecta el error y ordena a NAO a corregir el movimiento; (b) NAO empieza a corregir el movimiento; (c) NAO otorgando la retroalimentación, indicando al paciente que suba la rodilla derecha.

#### 4.2. Validación con la plataforma CPWalker

Una vez se ha comprobado el desempeño del algoritmo de procesamiento y de NAO en el sistema de rehabilitación mediante simulación, se procede a comprobar el desempeño de la integración directamente en el CPWalker. Para realizar esta validación, se ha conectado el ordenador con el algoritmo de procesamiento a la plataforma y se ha puesto en marcha el CPWalker con una simulación de sesión sin ningún paciente.

Una de las pruebas fue entorpecer la flexión de la cadera derecha frenando el CPWalker para que no realice correctamente este movimiento. Como se puede observar en la Figura 16, el algoritmo ha detectado correctamente este movimiento erróneo de cadera, por lo que NAO ha dado la retroalimentación correspondiente sin retraso. Concretamente, se destacan 3 eventos fundamentales: (a) se observa en la gráfica (círculo rojo) el momento en que el algoritmo detecta el movimiento erróneo de la cadera y se envía a NAO el código para la ejecución del comportamiento de corrección correspondiente; (b) se observa como NAO empieza a moverse para corregir al paciente; y (c) el robot NAO le dice al paciente que suba la rodilla derecha mientras levanta su brazo derecho.

Esta validación se ha realizado para todos los casos de monitorización de la cinemática de los pacientes (flexión rodilla, flexión y extensión cadera, todos para la pierna izquierda y derecha). En todos, los resultados han sido prometedores y suficientes para validar el correcto funcionamiento del sistema robótico social de rehabilitación desarrollado.

#### 5. Conclusiones

En este estudio se ha logrado desarrollar un nuevo sistema robótico social de rehabilitación de marcha para pacientes

pediátricos con parálisis cerebral, el cual consiste en las terapias de rehabilitación llevadas a cabo con la plataforma CPWalker, complementadas con sensores superficiales de electromiografía y el robot social NAO como componente rehabilitador y motivador. Se ha demostrado que este sistema es capaz de otorgar retroalimentación en tiempo real a los pacientes durante las terapias, a través del robot NAO, para aumentar su motivación durante las mismas y mejorar el desempeño del paciente. Además, se consigue agregar un nuevo factor a monitorizar durante las terapias que permite detectar y corregir patrones de activación muscular que realicen los pacientes y que sean perjudiciales para su marcha y salud.

#### Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado en una parte por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España a través del proyecto Discover2Walk bajo la subvención PID2019-105110RB-C31, y en otra parte por los Programas de Actividades I+D en la Comunidad de Madrid y Fondos Estructurales de la UE (RoboCity) bajo la Beca S2018. También, gracias a la colaboración de la Universidad Carlos III de Madrid, el Centro de Automática y Robótica (CSIC) y el Hospital Niño Jesús.

#### Referencias

- Bartlett, D. J., & Palisano, R. J. (2002). Physical Therapists' Perceptions of Factors Influencing the Acquisition of Motor Abilities of Children With Cerebral Palsy: Implications for Clinical Reasoning. *Physical Therapy*, 82(3), 237–248. <https://doi.org/10.1093/PTJ/82.3.237>
- Bartneck, C., Kulić, D., Croft, E., & Zoghbi, S. (2009). Measurement Instruments for the Anthropomorphism, Animacy, Likeability, Perceived Intelligence, and Perceived Safety of Robots. *International Journal of Social Robotics*, 1(1), 71–81. <https://doi.org/10.1007/s12369-008-0001-3>

- Bayón, C. (2018). Design, Development and Evaluation of a Robotic Platform for Gait Rehabilitation and Training in Patients with Cerebral Palsy [Universidad Carlos III de Madrid]. <http://hdl.handle.net/10261/167024>
- Booth, A. T. C., Buizer, A. I., Meyns, P., Oude Lansink, I. L. B., Steenbrink, F., & van der Krogt, M. M. (2018). The efficacy of functional gait training in children and young adults with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 60(9), 866–883. <https://doi.org/10.1111/DMCN.13708>
- Céspedes Gómez, N., Vivian, A., Echeverría, C., Munera, M., Bogotá, J. G., Rocon, C. E., Cifuentes, C. A., Calderon Echeverría, A. V., & Rocon, E. (2021). First interaction assessment between a social robot and children diagnosed with cerebral palsy in a rehabilitation context. *ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 484–488. <https://doi.org/10.1145/3434074.3447219>
- Comunidad de Madrid. (2022). Hospital Infantil Universitario Niño Jesús. <https://www.comunidad.madrid/hospital/ninojesus/>. (Último acceso: 8/10/2022).
- Delsys Incorporated. (2022). Trigno® Avanti Sensor - Delsys. <https://delsys.com/trigno-avanti/>. (Último acceso: 2/07/2022).
- Díaz, I., Gil, J. J., & Sánchez, E. (2011). Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges. *Journal of Robotics*, 2011, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2011/759764>
- Fasoli, S. E., Ladenheim, B., Mast, J., & Krebs, H. I. (2012). New horizons for robot-assisted therapy in pediatrics. *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 91(11 SUPPL.3). <https://doi.org/10.1097/PHM.0B013E31826BCFF4>
- Gardinier, E. S. (2009). The Relationship Between Muscular Co-Contraction and Dynamic Knee Stiffness in ACL-Deficient Non-Copers [University of Delaware]. <https://udspace.udel.edu/handle/19716/4251>
- Kozyavkin, V., Kachmar, O., & Ablikova, I. (2014). Humanoid social robots in the rehabilitation of children with cerebral palsy. *Proceedings - REHAB 2014*, 430–431. <https://doi.org/10.4108/ICST.PERVASIVEHEALTH.2014.255323>
- Law, M., Darrah, J., Pollock, N., King, G., Rosenbaum, P., Russell, D., Palisano, R., Harris, S., Armstrong, R., & Watt, J. (2009). Family-Centred Functional Therapy for Children with Cerebral Palsy. *Physical & Occupational Therapy In Pediatrics*, 18(1), 83–102. [https://doi.org/10.1080/J006V18N01\\_06](https://doi.org/10.1080/J006V18N01_06)
- Max Planck Institute for Psycholinguistics, The Language Archive, N. (2022). ELAN [computer software] (6.3). <https://archive.mpi.nl/tla/elan>
- Meyer-Heim, A., & van Hedel, H. J. A. (2013). Robot-Assisted and Computer-Enhanced Therapies for Children with Cerebral Palsy: Current State and Clinical Implementation. *Seminars in Pediatric Neurology*, 20(2), 139–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spen.2013.06.006>
- Pulido, J. C., González, J. C., Suárez-Mejías, C., Bandera, A., Bustos, P., & Fernández, F. (2017). Evaluating the Child-Robot Interaction of the NAOTherapist Platform in Pediatric Rehabilitation. *International Journal of Social Robotics*, 9(3), 343–358. <https://doi.org/10.1007/S12369-017-0402-2/TABLES/4>
- Pulido Pascual, J. C. (2020). Autonomous socially assistive robotics in pediatric clinical practice [Universidad Carlos III de Madrid]. <http://hdl.handle.net/10016/31276>
- Rosenbaum, P., Paneth, N., Leviton, A., Goldstein, M., & Bax, M. (2007). A report: the definition and classification of cerebral palsy April 2006. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(SUPPL. 2), 8–14. <https://doi.org/10.1111/J.1469-8749.2007.TB12610.X>
- Sewell, M. D., Eastwood, D. M., & Wimalasundera, N. (2014). Managing common symptoms of cerebral palsy in children. *BMJ*, 349. <https://doi.org/10.1136/BMJ.G5474>
- Shamsoddini, A., Amirsalari, S., Hollisaz, M.-T., Rahimnia, A., & Khatibi-Aghda, A. (2014). Management of Spasticity in Children with Cerebral Palsy. *Iranian Journal of Pediatrics*, 24(4), 345. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4339555/>
- SoftBank Robotics. (2022). NAO the humanoid and programmable robo. <https://www.softbankrobotics.com/emea/en/nao>. (Último acceso: 07/10/2022).
- Taylor, T. (2019). Muscles of the Leg and Foot. <https://www.innerbody.com/anatomy/muscular/leg-foot>
- Vallery, H., van Asseldonk, E. H. F., Buss, M., & van der Kooij, H. (2009). Reference Trajectory Generation for Rehabilitation Robots: Complementary Limb Motion Estimation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 17(1), 23–30. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2008.2008278>