

Sistema de Apoyo a la Terapia Física Basado en el Internet de las Cosas

Francisco José Moreno Alvarez¹, Walter Hernández¹
francisco.j.moreno@ucv.ve, walter.hernandez@ciens.ucv.ve

¹ Escuela de Computación, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

Resumen: Desde 2010, un alto porcentaje de la población (15%) a nivel mundial posee alguna discapacidad que afecta su desenvolvimiento en la sociedad, cifra que continúa en ascenso debido a diversos factores (envejecimiento de la población, proliferación de enfermedades crónicas, entre otros). El proceso tradicional de terapia posee un conjunto de problemas que involucran desde la infraestructura y personal en el centro médico, hasta el traslado del paciente. Dichos problemas, inciden en la calidad del servicio personalizado que requiere el paciente. Con la masificación del Internet y el surgimiento de paradigmas como el Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés), se manifiestan nuevas posibilidades para mejorar la atención en el área de la rehabilitación. En este trabajo se propone una arquitectura basada en IoT, que permite al paciente realizar su terapia desde la comodidad de su casa y al personal médico: seguir y adaptar la misma basándose en su progreso. La arquitectura propuesta, está compuesta por un conjunto de dispositivos *inteligentes* orientados a rehabilitación, una aplicación de Monitoreo de Actividades Terapéuticas (MAT) utilizada por el médico para asignar y controlar las sesiones de terapia, y un conjunto de servicios en la nube que coordina los demás componentes. Entre los aportes de esta solución se incluyen: un conjunto de mecanismos y reglas que permiten la integración y correcto funcionamiento de cualquier dispositivo *inteligente* en la arquitectura, y una herramienta que permite el diseño, asignación y monitoreo de actividades terapéuticas. La arquitectura propuesta fue sometida a un conjunto de pruebas de integración basadas en la simulación de escenarios, que validan su efectividad como herramienta computacional. Por último, se estima un incremento de la velocidad de atención en una sesión terapéutica de al menos unas 10 veces mediante el uso del sistema.

Palabras Clave: Arquitectura de Software; Internet de las Cosas; Terapia; IoT; Tele-Rehabilitación; Rehabilitación.

Abstract: Since 2010, a high percentage of the world's population (15%) has been established to have some disability which constrains its life in society. This percentage is still growing due to several factors such as population aging and chronic diseases. Traditional therapy has an inherent set of issues that range from infrastructure to the lack of staff in medical centers. These problems affect the quality of both the personal and customized service required by the patient. With the massification of the Internet and new paradigms such as the Internet of Things (IoT), new possibilities to improve the rehabilitation service arise. In this proposal, an architecture based on IoT which allows the patient to do therapy from home has been developed. It also provides tools which enables the therapist with the required information to track the patient's progress and adapt the therapy accordingly. The proposed architecture is compound by a set of *smart* devices for therapy, a software application used by the therapist to assign and monitor therapy sessions and cloud services to control all the components of the architecture. The main contributions are: a set of tools and rules to easily configure and integrate any *smart* device for therapy into the architecture, as well as an application to design, assign and monitor therapy activities. The proposed architecture has been tested through simulated scenarios that validate its computational effectiveness. Finally, with the use of the proposed architecture a patient has been estimated to be served 10 times faster than with traditional therapy.

Keywords: Software Architecture; Internet of Things; Therapy; IoT; Tele-Rehabilitation; Rehabilitation.

I. INTRODUCCIÓN

En el año 2011, la Organización Mundial para la Salud (OMS) y el Grupo del Banco Mundial presentó un informe en el que se estimó que más de mil millones de personas (aprox. 15% de la población mundial) vivían con algún tipo de discapacidad [1].

Dicha cifra resulta superior a la estimación del 10% realizada por el mismo organismo en el año 1970. Este crecimiento de la proporción de individuos con discapacidades, se ve principalmente impulsado por el envejecimiento de la población, el cual es un factor de relevancia debido a que el riesgo de

sufrir una lesión o desarrollar alguna enfermedad crónica que conlleve una discapacidad, aumenta con respecto a la edad de la persona. En el año 2002, la OMS [2] reportó que al menos cinco millones de personas sobreviven a un ataque cerebro vascular cada año y que la mitad de ellos permanecen con hemiparesia (debilidad o parálisis parcial en la mitad del cuerpo). En el año 2017, el Centro de Control y Prevención de Enfermedades (CDC por sus siglas en inglés), indica que el 25.6% de la población adulta en Estados Unidos sufre de algún tipo de discapacidad [3]. Por su parte, el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) en el último censo realizado en 2011, indica que el 5.38% de la población venezolana sufre de alguna discapacidad, agrupándolas en tres tipos principales como: visual, cardiovascular y músculo esquelética, representando el 1.7%, 1.1% y 0.9% respectivamente [4].

En la Figura 1, se evidencia como una deficiencia visual, motora o cardiovascular, afecta actividades primordiales de la vida en sociedad tales como: el acceso a la educación, el acceso y desempeño en el trabajo y, la facilidad de aprendizaje. Adicionalmente, un gran esfuerzo y tiempo es necesario para cumplir con tareas esenciales como: aseo personal, alimentación, movilización e incluso socializar. En consecuencia, el paciente normalmente depende de asistencia, que de no obtenerla, podrían incrementar sus problemas de salud física y mental, desencadenando trastornos depresivos y finalmente deteriorando su calidad y la de su grupo familiar.

Al someterse a rehabilitación, el paciente puede erradicar o disminuir el grado de su discapacidad, hecho de vital importancia ya que evidentemente una discapacidad significa un riesgo directo e indirecto para su salud. Sin embargo, los métodos tradicionales de terapia involucran asistir a un centro médico, lo cual conlleva otro conjunto de problemas. Diversos factores deben ser considerados y planificados para poder asistir a la cita médica, por ejemplo: evaluar qué medios de transporte son los más adecuados para el paciente, cuáles son los mejores horarios para trasladarse, cómo satisfacer los requerimientos de un posible régimen especial de alimentación fuera de casa, entre otros. Además, se deben tener en cuenta las necesidades del acompañante del paciente, por ende, es necesario añadir: la alimentación y transporte del acompañante, tiempo fuera del trabajo, entre otros. Dichos factores, impactan económica y emocionalmente tanto al paciente como al acompañante y se traducen en asistencias irregulares a las sesiones de terapia que eventualmente conllevan a una posible deserción.

El problema anterior, es complementado con la falta de personal y espacio físico que existe en los centros hospitalarios a nivel mundial, razón que provoca el distanciamiento entre cada sesión de terapia o el deterioro de la calidad de las mismas, lo que afecta la velocidad de recuperación del paciente. Como solución, los pacientes son comúnmente forzados a cumplir gran parte de sus terapias en sus casas. Esto, opaca los problemas del paciente para asistir a la cita médica y los del hospital para prestarle el servicio adecuado; sin embargo, en casa y sin supervisión directa de un médico calificado, resulta imposible garantizar el cumplimiento de los ejercicios y su

correcta ejecución, lo cual incide en la correcta recuperación del paciente.

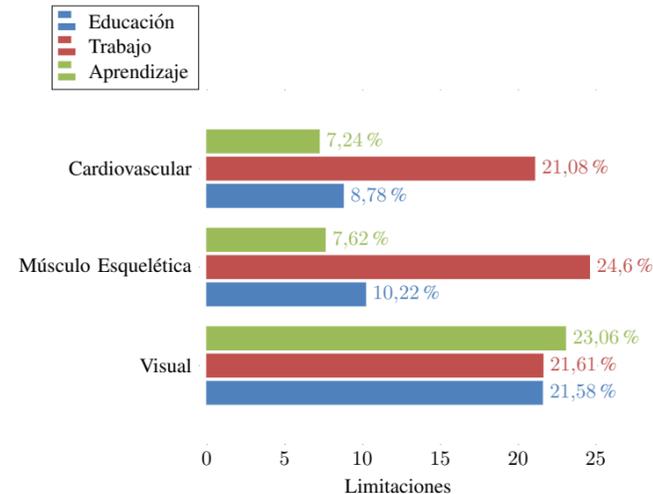


Figura 1: Principales Limitaciones de las Personas con Discapacidad, CENSO 2011 [4]

En el presente trabajo, se ofrece una solución que le permite al personal médico asignar y monitorear sesiones de terapia de manera remota a sus pacientes. Para el desarrollo de dicha aplicación, se propone una arquitectura basándose en una rama de estudio emergente conocida como: El Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés). En este escenario se plantea una red global de dispositivos que interactúan entre ellos [5][6] mediante la incorporación de la capacidad para: identificarse, percibir su entorno, procesar información e interconectarse.

Particularmente, se plantea una aplicación Web que el personal médico utiliza para: asignar sesiones de terapia a sus pacientes y monitorear el progreso de los mismos. De igual manera, se generan las estructuras de la arquitectura que permiten: la interconexión de la aplicación utilizada por el terapeuta y los dispositivos inteligentes que imparten la terapia al paciente. La arquitectura está diseñada de manera tal que facilite la integración de un conjunto heterogéneo de dispositivos capaces de trabajar con diversas patologías médicas. Por ende, se plantean mecanismos para: registrar un nuevo dispositivo a la red, suministrar los parámetros de configuración de terapia e indicar el tipo de medidores de desempeño que el dispositivo registra durante la terapia. En la propuesta actual se presume la existencia de dispositivos inteligentes cuya efectividad médica está comprobada y que son capaces de suministrar y evaluar por si mismos la actividad para la que fueron diseñados.

Mediante la simulación de dispositivos básicos integrados a la propuesta, se pudieron realizar un conjunto de pruebas para probar la efectividad del sistema como herramienta de agilización del proceso de terapia. Se pudo estimar que el tiempo de atención de un paciente disminuye al menos 10 veces con el uso de la aplicación, considerando únicamente el tiempo que el paciente invierte viajando a un centro hospitalario y el tiempo promedio de espera por atención *in situ*.

El resto del trabajo se presenta en 5 secciones. La Sección

II menciona un conjunto de investigaciones que a lo largo del tiempo comprueban la efectividad de la tele-rehabilitación como técnica de terapia. La Sección III describe brevemente algunos trabajos relacionados a la propuesta que se presenta en la Sección IV. La Sección V plantea las pruebas que se realizaron al sistema para evaluar su efectividad computacional y su habilidad para agilizar el proceso que involucra la terapia. Finalmente, la Sección VI expone las conclusiones del trabajo y trabajos futuros.

II. EFECTIVIDAD DE LA TELE-REHABILITACIÓN SOBRE EL MÉTODO TRADICIONAL

Los avances tecnológicos generan propuestas alternativas a la terapia tradicional, como la rehabilitación a través de realidad virtual, la cual fue inicialmente estudiada como un mecanismo para afrontar fobias [7][8] y se ha expandido hasta ser utilizada como una forma alternativa de terapia física [9][10][11]. Con los avances en las telecomunicaciones, la tele-rehabilitación prueba ser una solución factible para monitorear el desempeño del paciente fuera de la institución médica. Efectividad que se comprueba en el estudio [12], en donde se valida la tele-rehabilitación como técnica de terapia en pacientes que poseen problemas motores en los miembros superiores producto de una lesión cerebral. En dicho estudio, analizan el progreso que obtienen seis pacientes, luego de ser entrenados de manera remota durante seis semanas, con una frecuencia de cinco días por semana y setenta minutos por día; contando con la supervisión intermitente por parte del personal médico, la cual fue eliminada progresivamente por decisión de los pacientes a medida que manifestaban la capacidad de realizar los ejercicios de manera autónoma. Como resultado, todos los pacientes involucrados en el estudio mejoraron su rango de movilidad, confirmando la efectividad de la tele-rehabilitación como alternativa a la terapia tradicional.

Un estudio más reciente [13] realiza una extensa revisión bibliográfica en la que evalúa la efectividad médica de la tele-rehabilitación con respecto a los métodos tradicionales. En dicho estudio, abarcan cualquier tipo de patología (desde terapia física a psicológica) que requiera rehabilitación. Además, aíslan los pacientes que fueron rehabilitados mediante el proceso tradicional, de los pacientes que fueron tratados exclusivamente mediante tele-rehabilitación o siguiendo un enfoque híbrido. Los autores concluyen, que la tele-rehabilitación es tan efectiva como la terapia tradicional.

Otro estudio [14] analiza la perspectiva de los allegados que cuidan a la persona que sufre de una discapacidad. En este, se asigna un costo monetario al tiempo que dedican dichas personas durante los días que el paciente debe realizar terapia en el centro hospitalario. El costo es calculado en base a: los gastos en transporte, alimentación del día y el costo asociado a las horas que deben faltar al trabajo para acompañar al paciente. Estiman, que los cuidadores ahorran un promedio de 1024 dólares, luego de realizar 16 sesiones de manera remota. Las sesiones se suministraron a través de vídeo llamadas, permitiéndole al cuidador realizar otras tareas que antes no podían efectuar durante el transcurso de la misma. El estudio

concluye indicando el alto grado de aceptación por parte de los cuidadores y de los pacientes, apoyándose en el ahorro económico producto del tratamiento remoto, además de la cantidad de horas ahorradas en preparación para asistir a la terapia y el grado de estrés que representaba la misma.

III. TRABAJOS RELACIONADOS

Según Atzori et al. [15], las áreas de estudio de *IoT* se pueden agrupar en 4 dominios: Transporte y Logística, Ambientes inteligentes, Personal y Social y Salud.

Específicamente en el contexto de la salud, *IoT* se ha explorado como herramienta de prevención de reacciones adversas a medicamentos suministrados a pacientes [16]. Vigilancia de pacientes en ambientes cerrados con necesidades especiales y sistemas de alerta temprana [17][18][19]. Control de signos vitales de pacientes en áreas rurales remotas con baja inversión monetaria [20]. Predicción de diagnóstico de enfermedades basado en signos vitales [21]. Atención y monitoreo de un gran número de pacientes mediante el uso de agentes especialistas en tipo de signo vital o patología [22].

Para la asistencia de personas con discapacidades Domingo et al. [23] propone una arquitectura para *IoT*, compuesta de tres capas:

- **Capa de Percepción:** Compuesta por sensores, efectores y estaciones de monitoreo, cuyo objetivo es recolectar información.
- **Capa de Redes:** Consiste de las redes alámbricas e inalámbricas utilizadas para transmitir la información recolectada por la capa de percepción.
- **Capa de Aplicación:** Es un conjunto de aplicaciones que utilizan la información recolectada, para satisfacer la necesidad del paciente.

Cabe destacar que en dicho trabajo se hace hincapié en la importancia de la “Capa de Percepción”, como herramienta para minimizar el efecto de la discapacidad sobre la vida de la persona, nunca se propone un mecanismo de rehabilitación para mejorar la condición del paciente.

Por otra parte Bui et al. [24] y Dohr et al. [25] proponen un esquema similar para *IoT* enfocado en el cuidado de la salud. En dichos trabajos exponen un escenario donde el paciente debe cumplir con una rutina diaria compuesta de una medición de signos vitales y el consumo de algunos medicamentos prescritos. Para garantizar el cumplimiento de la rutina, se integran sensores al equipo médico utilizado por el paciente (capa de *hardware*) y los datos que estos recolectan son capturados por un teléfono inteligente y son enviados a un sistema central en el centro médico (capa de *middleware*). Dichos datos, son dispuestos al personal médico y familiares con el fin de permitirles evaluar la condición del paciente y tomar acciones (capa de servicios). Finalmente, se complementa con un sistema de alertas en caso de poseer valores anómalos en los datos recolectados o en caso de que el paciente olvide realizar el registro de los signos vitales.

Vukićević et al. [26] presenta un sistema de tele-rehabilitación basado en *IoT*, que aplica efectivamente terapia física de

manera remota, eliminando la intervención presencial del personal médico durante su práctica y procurando mantener motivado al paciente a realizar diariamente el mismo grupo de ejercicios.

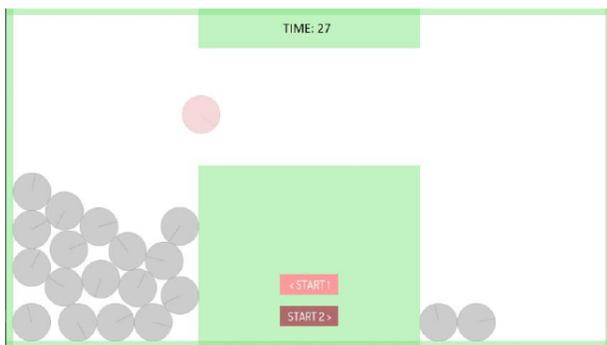


Figura 2: Juego Serio Desarrollado en [26]

Los ejercicios de rehabilitación son presentados al paciente en forma de un juego serio con el objeto de proponerle al paciente: un reto, un objetivo claro y una forma divertida de realizar los ejercicios repetitivos que componen una sesión de terapia. Los ejercicios propuestos, son diseñados para tratar pacientes con movilidad reducida en los miembros superiores. Durante el desarrollo de la actividad, el desempeño del paciente es evaluado mediante un conjunto de *hardware* especializado. Precisamente, se observa la postura del brazo trabajado mediante un *Microsoft Kinect* (*hardware* diseñado para hacer seguimiento del cuerpo del usuario). Por otra parte, se evalúa la contracción del bíceps, generada al abrir o cerrar la mano, mediante un sensor que supervisa la actividad eléctrica producida en los músculos, el cual se encuentra conectado a un *Arduino* (computador compacto en una sola pieza) que procesa la señal.

El juego consiste de un conjunto de círculos, que el paciente debe mover de un extremo de la pantalla al otro sobrepasando un obstáculo (ver Figura 2). Para mover los círculos, el paciente debe mover el brazo hasta alcanzar uno y cerrar la mano para recogerlo; análogamente, deberá mover el brazo para colocarlo en el extremo contrario de la pantalla y abrir la mano para depositarlo. El objetivo es evaluar la velocidad con la que el paciente es capaz de mover todos los círculos de la posición inicial a la final.

Los autores proponen una arquitectura que se puede observar en la Figura 3. En la misma, se dispone de una aplicación para el terapeuta mediante la cual puede observar el progreso del paciente, una aplicación que contiene el juego serio, una capa de software para almacenar y procesar los datos recolectados durante la terapia, un conjunto de herramientas de análisis de los datos para uso del terapeuta y la integración del registro médico del paciente para facilitar el diagnóstico y evaluación del progreso de la patología del mismo.

Finalmente, demuestran la factibilidad del sistema como herramienta de terapia probándolo con un paciente de 60 años, el cual es tratado durante un mes exclusivamente mediante la aplicación de manera remota. Los datos recolectados por la

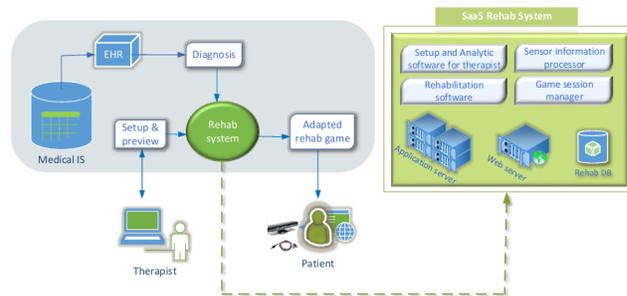


Figura 3: Arquitectura Propuesta en [26]

aplicación dan como resultado la Figura 4, donde se percibe la mejora en movilidad y precisión del paciente en el transcurso de los días.

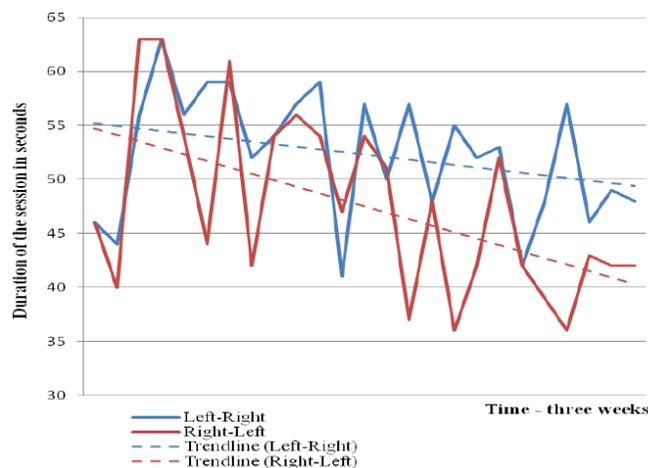


Figura 4: Progreso Obtenido por el Paciente en el Periodo de Prueba [26]

Por último, Ferreira et al. [27] investiga como *ludificar* los aparatos que se utilizan tradicionalmente en la terapia de rehabilitación de pacientes con problemas motores en los miembros superiores. Para ello proponen un conjunto de juegos serios (ver Figura 5), que con la ayuda de hardware especializado (*Razer Hydra Motion Controllers* y *Oculus Rift*), son capaces de suministrarle la terapia al paciente siguiendo los parámetros de la terapia tradicional. La terapia es suministrada de manera remota, por lo que la solución se complementa con un módulo que le permite al terapeuta visualizar los resultados capturados por el juego serio y configurar parámetros para la siguiente terapia.

La propuesta de este documento nace con la intención de dar continuidad a la investigación de Moreno et al. [28] donde se propone un *framework* basado en realidad virtual semi-inmersiva, que tiene el objetivo de actuar como herramienta de rehabilitación física para pacientes con discapacidades en los miembros superiores, cuyas edades oscilan entre los 6 y 12 años. Dicho trabajo tuvo como principal objetivo mantener motivado a los pacientes a cumplir con la terapia (disminuir el índice de deserción) y proveer datos de progreso al personal médico. Para cumplir con el mismo, las actividades



Figura 5: Paciente Haciendo Uso del Sistema Propuesto en [27]

terapéuticas se diseñaron en la forma de juegos serios, en los que la motricidad gruesa y fina del paciente eran evaluadas por *hardware* especializado, los cuales proveen al médico de información del desempeño del paciente, durante y luego de la culminación de la actividad.

El problema que posee la investigación previa es la imposibilidad de utilizar la herramienta fuera del centro médico, ya que la misma requiere de la intervención presencial de personal médico. Problema que será abordado mediante la incorporación de técnicas de *IoT*, planteando una arquitectura enfocada en la rehabilitación de pacientes con problemas motores, tomando en cuenta los esquemas de desarrollo y consideraciones expuestas por [24][25][15].

IV. PROPUESTA

El Internet de las Cosas es definido como una red ubicua compuesta por un grupo heterogéneo de dispositivos “inteligentes”. Un dispositivo es considerado “inteligente” si es capaz de mantener una comunicación permanente con otros objetos y ser consciente de su entorno, esto implica que debe percibir y procesar de manera constante todo estímulo proveniente del ambiente. Un estímulo puede originarse como producto de la interacción del usuario, el análisis de algún área de interés (medición de un sensor, análisis de una imagen, entre otros) o como resultado de los mensajes transmitidos a través de la red.

En el contexto de la terapia de rehabilitación, *IoT* puede aplicarse a la asignación, ejecución y evaluación de una actividad terapéutica mediante el uso de dispositivos “inteligentes”.

El escenario propuesto inicia con el acceso del terapeuta a una aplicación *Web* en donde asigna una sesión de terapia al paciente, hecho que desencadena una notificación que recibe el paciente a través de un dispositivo “inteligente”. Dicha notificación, le indica la actividad a realizar y la fecha en que debe cumplir con la misma. El día de la terapia, el dispositivo le recuerda al paciente la sesión pautada, este realiza las actividades propuestas, siguiendo las instrucciones suministradas por el dispositivo. Una vez que concluye, continúa con sus actividades del día. Los datos recolectados por el dispositivo, son enviados de vuelta al médico para que analice el desempeño del paciente y diseñe la nueva sesión de terapia que mejor se ajuste al progreso demostrado.

En el escenario anterior, los estímulos provenientes de la red vienen en la forma de notificaciones:

- Nueva sesión terapéutica asignada.
- Recordatorios para el cumplimiento de la terapia asignada.
- Actividades completadas.
- Sesión inconclusa (caso especial en que el paciente no realiza la terapia a tiempo).

De igual forma, los estímulos que recibe el dispositivo son una combinación de los estímulos de la red más la interacción con el usuario:

- Usuario detectado en el área de interés.
- Interacción específica del usuario.
- Registro de los datos correspondientes al efectuar la actividad propuesta.

En la Figura 6 se presenta la arquitectura basada en *IoT* propuesta en este trabajo, en la misma se pueden observar un conjunto de elementos claramente separados:

- **Dispositivos terapéuticos** (color rojo): Conjunto heterogéneo de dispositivos “inteligentes” diseñados para evaluar un conjunto de ejercicios específicos que tratan una patología médica.
- **Servicios en la nube** (color verde): Que tiene como ente central el *API* (*Application Programming Interface* - Interfaz de Programación de Aplicaciones), que tiene como objetivo principal coordinar el resto de los componentes. Almacenes de datos. Un gestor de mensajes que mantiene una comunicación permanente con los dispositivos terapéuticos. Y finalmente, un conjunto de programas que atienden las peticiones realizadas por los dispositivos terapéuticos (Trabajadores, en color amarillo).
- **Capa de aplicación** (color azul): Contiene una aplicación denominada *MAT* (*Monitor de Actividades Terapéuticas*) que es utilizada por el médico y los pacientes para monitorear el progreso de la rehabilitación.

A. Servicios en la Nube

En esta sección se describen cada uno de los servicios dispuestos en la nube que, en conjunto, mantienen en perma-

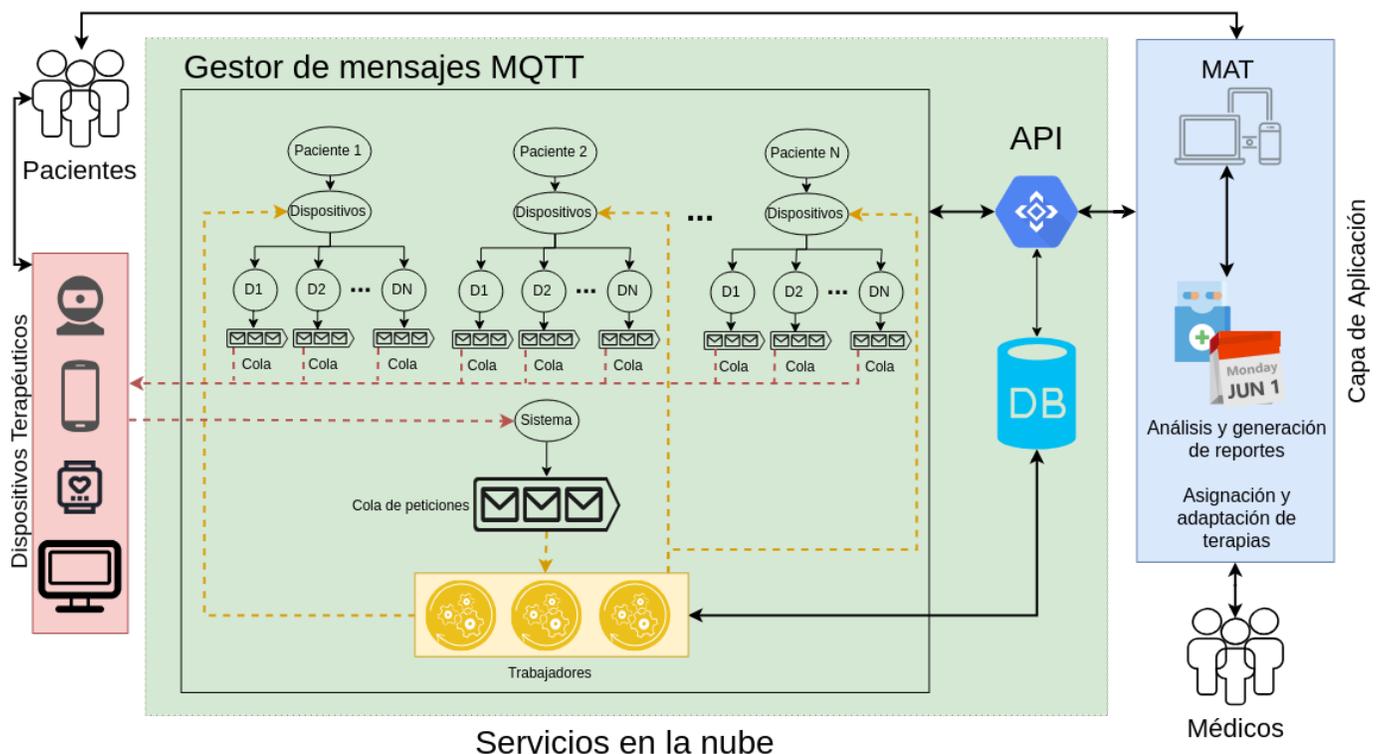


Figura 6: Arquitectura Basada en IoT para Apoyar la Terapia de Rehabilitación

nente comunicación a todos los componentes del sistema y almacenan todos los datos registrados por cada uno de ellos.

1) *API (Application Programming Interface - Interfaz de Programación de Aplicaciones):* Es un API Web que tiene como objetivo principal registrar los datos asociados a las sesiones terapéuticas, los cuales son de naturaleza heterogénea y motivan el uso de bases de datos no relacionales (*NoSQL*), ya que las mismas poseen la capacidad de manejar datos con estructuras cambiantes y diversas. Adicionalmente, la aplicación generará un gran contenido de información rápidamente, lo que explota la característica de escalamiento horizontal que presentan las bases de datos *NoSQL* [29]. Particularmente para este trabajo, se utilizan bases de datos orientadas a documentos, el cual es el tipo de base de datos *NoSQL* más adaptable a una vasta gama de aplicaciones [30]. Específicamente se emplea como manejador *MongoDB*¹, ya que posee una gran madurez al ser extensamente utilizado en el mercado competitivo.

Con el objeto de permitir trabajos futuros donde se deseen realizar búsquedas complejas sobre la base de datos, por ejemplo aplicar procesos de minería de datos, se decidió implementar el API utilizando el lenguaje de consulta (*Query*) GraphQL [31] diseñado por la compañía Facebook. GraphQL flexibiliza el acceso a la información provista por el API, permitiéndole al cliente diseñar sus propias consultas especializadas sobre los datos que requiera. Como servidor que implementa GraphQL se utilizó Apollo Server².

Además de los datos asociados a las sesiones terapéuticas, el API provee funciones administrativas como:

- Registrar usuarios.
- Registrar tipos de dispositivos.
- Registrar los tipos de actividades soportadas por dispositivo.
- Asignar pacientes a un terapeuta.
- Asignar dispositivos a un paciente.

Al momento de registrar un nuevo tipo de dispositivo, el usuario (en este caso el desarrollador del dispositivo) debe indicar la lista de parámetros generales que requiere que el API le suministre al mismo para iniciar una actividad terapéutica, así como los tipos de actividades terapéuticas que soporta y los parámetros que requiere. Para esto, se proveen de un conjunto de herramientas con las que puede especificar: el tipo de cada parámetro, los valores válidos para el mismo, el tipo de unidad (en caso de que aplique) y si es obligatorio u opcional; de igual manera permite especificar tipos de datos estructurados complejos y listas. Dichas funciones son provistas al desarrollador del dispositivo a través del API, con la intención de maximizar la cantidad de dispositivos y terapias que pueda manejar la arquitectura.

2) *Gestor de Mensajes:* Tiene como objetivo gestionar la comunicación en tiempo real entre los dispositivos “inteligentes”, el API y la capa de aplicaciones; por lo tanto, es necesario contar con un protocolo de comunicación de buena calidad. *MQTT*³ (*Message Queue Telemetry Transport - Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes*), es un

¹<https://www.mongodb.com/es>

²<https://www.apollographql.com/docs/apollo-server>

³<http://mqtt.org>

protocolo de mensajería ampliamente utilizado en el ámbito de *IoT* puesto que es eficiente, está probado ser de bajo consumo energético, puede ser cifrado y está desarrollado para trabajar en redes de baja velocidad [32]. *MQTT* trabaja bajo un esquema suscripción/publicación, en el que cada nodo se suscribe a un tópico del cual quiere recibir información. Cuando algún paquete dirigido a un tópico es recibido, un nodo central denominado *broker* se encarga de distribuirlo a todos los nodos que se encuentren suscritos a dicho tópico. La especificación de los tópicos puede ser jerárquica, permitiendo establecer esquemas de transmisión complejos, en los que se generan filtros de mensajes al suscribirse a nodos específicos del árbol que establece la jerarquía. Como *broker* se utiliza *RabbitMQ*⁴, el cual es políglota y tiene la capacidad de operar con múltiples protocolos de mensajería simultáneamente, característica que es explotada en la arquitectura propuesta.

En la Figura 6 se puede observar parte de la estructura de tópicos (representada por óvalos) que se emplea en el sistema. Se provee de un tópico por cada usuario registrado, el cual tiene múltiples hijos para canalizar distintos tipos de mensajes, entre ellos, los dirigidos a dispositivos que tenga registrado el paciente (“dispositivo”). Contar con dicho tópico general permite poder recibir los mensajes dirigidos a todos los dispositivos del paciente, al suscribirse al mismo. Cada dispositivo está suscrito al tópico específico que tiene como identificador su nombre, dicho tópico es un hijo en el árbol de jerarquía del paciente que posea el dispositivo.

La estructura descrita anteriormente es utilizada por los dispositivos para recibir información dirigida a ellos, cuando desee solicitar alguna operación, el mismo publica un mensaje en el tópico “sistema”, su solicitud será procesada por un grupo de procesos especializados (trabajadores) y estos publicarán el resultado de la misma en el tópico específico del dispositivo.

3) *Trabajadores*: Conjunto de procesos diseñados con la intención de permitirle a los dispositivos solicitar información a través del protocolo *MQTT*. El problema con dicho protocolo es que al ser basado en tópicos, resulta imposible implementar de manera directa una cola de trabajo que permita distribuir equitativamente un conjunto de trabajos entre un grupo de procesos. Como solución se explotan las capacidades de *RabbitMQ* para trabajar con múltiples protocolos simultáneamente. A través del protocolo de comunicación *AMQP* (*Advanced Message Queuing Protocol* - Protocolo Avanzado de Cola de Mensajes) [33] se crea una cola de trabajos específica que se asocia al tópico “Sistema”. Dicha cola se configura para que despache un trabajo a cualquier proceso registrado a la misma, de esta forma se garantiza que ningún trabajador este ocioso si quedan peticiones por atender, maximizando el tiempo de trabajo. Ya que la cola se encuentra asociada a un tópico, ambos protocolos de mensajería pueden coexistir. De igual forma, cuando el trabajador culmina su trabajo, puede comunicar el resultado del mismo publicando un mensaje en el canal específico del dispositivo que realizó la solicitud.

A fin de mejorar la robustez del sistema, los trabajadores

realizan las siguientes consideraciones:

- No eliminan un trabajo de la cola, hasta que el mismo no fue completamente procesado.
- En caso de requerir confirmación por parte del dispositivo, no aceptan otro trabajo hasta recibir la confirmación.
- Poseen un tiempo de espera por confirmación. En caso de no recibirla en el lapso establecido, reenvían el mensaje. Si sobrepasan un número de intentos, desechan el trabajo.

B. Dispositivos Terapéuticos

Compuesta por un conjunto de dispositivos “inteligentes” especializados en un tipo de ejercicios o terapia que tienen como objetivos:

- Notificar al usuario la recepción de una nueva terapia.
- Suministrar la terapia al paciente con los parámetros especificados por el médico.
- Registrar y evaluar la calidad de los ejercicios realizados por el paciente durante la terapia.
- Proveer de información al paciente sobre su desempeño mientras el mismo efectúa la terapia.
- Enviar los datos recolectados al gestor de mensajes para que registre la información en la base de datos.

Debido a la variabilidad del tipo de dispositivo y de su propósito, es responsabilidad del desarrollador de un nuevo dispositivo, registrar correctamente los parámetros que requiera para poder ejecutar las actividades terapéuticas que proponga. De igual manera, es responsable de enviar en conjunto con los resultados del ejercicio y algún tipo de métrica general con la que se pueda evaluar el desempeño del paciente.

El dispositivo debe tomar las siguientes consideraciones para mejorar la robustez del sistema:

- En caso de perder conexión con el servidor de mensajes, solicitar nuevas terapias a partir de la última recibida.
- Si se solicitó información al servidor de mensajes y no se recibe respuesta luego de un periodo de tiempo, volver a solicitar la información.
- Esperar la confirmación de la recepción de los datos de desempeño de una terapia concluida. Si no se recibe la confirmación, reenviar la misma.

Cabe destacar, que con el desarrollo de los trabajadores, se incentiva a que los dispositivos realicen la comunicación exclusivamente a través de *MQTT*. Sin embargo, en caso de ser necesario, el dispositivo puede realizar peticiones directamente al *API*.

Todo dispositivo “inteligente” registrado en el sistema, es responsable de la administración y evaluación de la terapia. En este trabajo, se asume la existencia de dispositivos cuya efectividad médica fue previamente validada. Dichos dispositivos, pueden ser adaptados para que cumplan con las consideraciones anteriormente expuestas y se puedan incluir de manera transparente a la solución.

⁴<https://www.rabbitmq.com>

C. Capa de Aplicación

Comprende las aplicaciones de consulta y análisis de los datos terapéuticos, así como aplicaciones administrativas.

1) *Monitor de Actividades Terapéuticas (MAT)*: El Monitor de Actividades Terapéuticas es la aplicación Web encargada de gestionar la asignación y configuración de las actividades terapéuticas, así como actividades administrativas que corresponden: a la creación de usuarios, asignación de pacientes a médicos, gestión de los datos del paciente, entre otros.

Esta aplicación le permite tanto al terapeuta como al paciente: observar el progreso obtenido a lo largo de la terapia, mediante con un conjunto de estadísticas que indican el progreso en general del paciente; así como la posibilidad de consultar su desempeño en una actividad en particular. Tiene como función proveer al terapeuta de una interfaz que le permita: seleccionar las actividades terapéuticas que realizará el paciente, adaptar los parámetros en base a los resultados de las últimas sesiones y asignar el día de la misma.

El desarrollo de la aplicación se llevó con la librería de amplio uso para la construcción de interfaces de usuario React⁵, utilizando como cliente de GraphQL Apollo Client⁶. Mediante las características que provee GraphQL, la aplicación es capaz de recibir notificaciones en tiempo real al conectarse al servidor de gestión de mensajes.

V. PRUEBAS

Con el objetivo de comprobar la eficacia computacional del sistema, se desarrollaron dos tipos de pruebas:

- **Pruebas caja blanca:** Este tipo de pruebas tienen conocimiento total de la estructura interna de cada componente, por ende, analiza en detalle el correcto funcionamiento de las clases y funciones que lo conforman. Están compuestas por un conjunto de pruebas unitarias y funcionales para cada componente.
- **Pruebas caja negra:** Con este método se considera el sistema completo como una caja negra [34], por lo cual no se tiene ningún conocimiento acerca de la estructura interna de ninguno de los componentes que lo conforman. Corresponden a un conjunto de pruebas de integración, en las que se valida el correcto funcionamiento del sistema ante escenarios hipotéticos. Este tipo de pruebas son de mayor complejidad ya que consideran la interacción entre cada elemento presente en la arquitectura.

Para las pruebas de caja negra se consideró el caso de uso principal del sistema. En el mismo, un terapeuta asigna una sesión terapéutica a través del MAT. El dispositivo “inteligente” del paciente recibe la terapia asignada y se lo informa. El paciente efectúa la terapia asignada y el resultado de la misma es devuelto al personal médico.

En dicho caso, se plantea una evaluación basada simulación [35]: en donde el comportamiento de los dispositivos “inteligentes”, paciente y médicos son simulados. Ya que la

interacción del paciente es exclusiva con el dispositivo, ambos serán considerados como un solo ente en las simulaciones; dicha asunción también aplica para el médico que interactúa exclusivamente con el MAT.

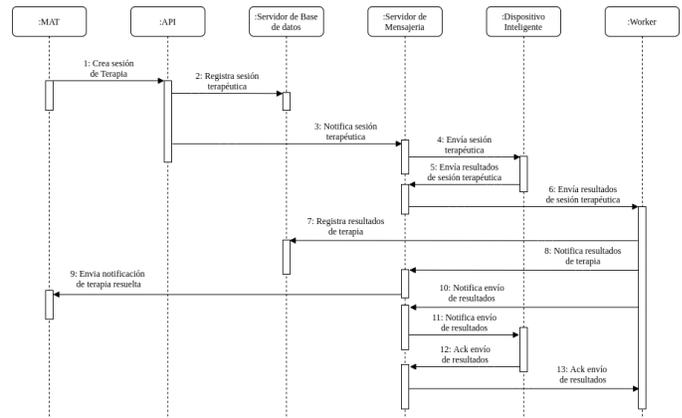


Figura 7: Caso Ideal

En la Figura 7, se puede observar como los mensajes fluyen a través de los componentes del sistema desde que se asigna una sesión de terapia al paciente, hasta que el mismo la realiza. En dicha Figura se expone el caso ideal, donde ningún componente falla y todos los mensajes se transmiten sin ningún tipo de inconveniente. En las pruebas realizadas, se simulan fallos de conexión en puntos claves del flujo de mensajes con el objeto de verificar la robustez del sistema. Es importante mencionar, que dichas pruebas no tienen la intención de validar la correcta transmisión de un mensaje entre dos componentes, ya que el protocolo de comunicación *MQTT* y los canales de transmisión la garantizan. Las pruebas, validan el envío de información entre los puntos finales del flujo, lo que involucra el paso de múltiples mensajes entre distintos componentes en el sistema.

A. Dispositivo Sin Conexión

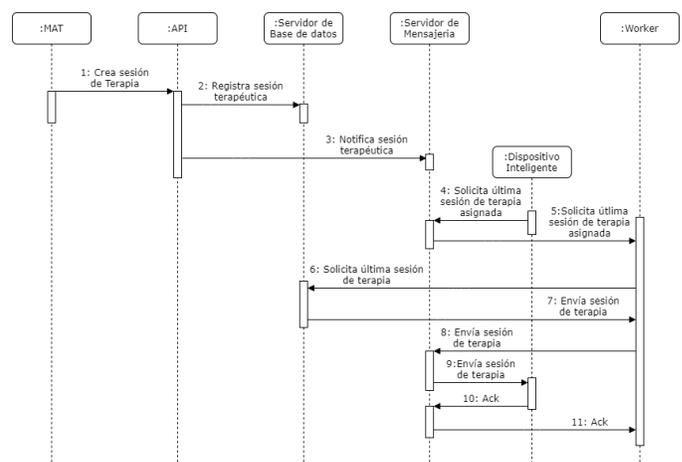


Figura 8: Dispositivo Sin Conexión

En la Figura 8 se muestra el flujo de mensajes que el sistema genera cuando el dispositivo “inteligente” al que se le asigna la sesión de terapia, no se encuentra conectado en el momento de

⁵<https://es.reactjs.org>

⁶<https://www.apollographql.com/docs/react>

dicha asignación. En este caso, como se puede observar en el paso 4, cuando el dispositivo restablece la conexión al sistema, el mismo solicita la última sesión de terapia que se le haya asignado. Dicha solicitud es atendida por un trabajador, el cual, le suministra la última sesión que le fuera asignada. Debido a la existencia de los trabajadores, el sistema puede continuar funcionando aunque el dispositivo no estuviese conectado en el momento que el terapeuta creó la sesión terapéutica.

B. Dispositivo Pierde Conexión Luego de Solicitud

Expande el caso planteado en la Figura 8, agregando un fallo de conexión al dispositivo luego de que este solicita la última sesión de terapia (paso 4). Dependiendo de la duración de la desconexión se presentan 4 posibles escenarios:

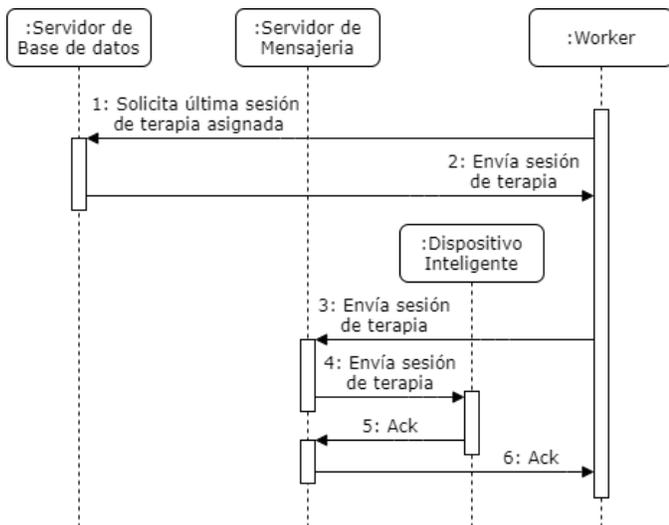


Figura 9: Reconexión Antes de Respuesta

1) *Restablecimiento de la Conexión Antes de Recibir la Respuesta:* El escenario presente en la Figura 9 corresponde con un periodo de desconexión muy corto. En el mismo, se puede observar que el dispositivo restablece la conexión antes de que el trabajador termine de procesar la solicitud. Debido a esto, el trabajador no se percata de la momentánea desconexión del dispositivo “inteligente” y el flujo de mensajes continúa de manera normal.

2) *Reintentos Fallidos:* En contraposición al caso anterior, en la Figura 10 se ejemplifica el funcionamiento del sistema cuando el dispositivo “inteligente” pierde la conexión con el sistema por un periodo de tiempo largo, luego de haber solicitado la última sesión de terapia. En este caso, el trabajador luego de esperar un tiempo por la confirmación de recepción (por parte del dispositivo), reenvía el resultado de la solicitud. Cuando el número de reintentos alcanza su límite, el trabajador descarta la solicitud. Cuando el dispositivo restablece la conexión, el mismo vuelve a solicitar la última sesión de terapia y el flujo continúa de manera normal como se establece en la Figura 8.

3) *Restablecimiento de la Conexión Durante Reintentos(1):* En la Figura 11 se plantea un tiempo de desconexión moderado

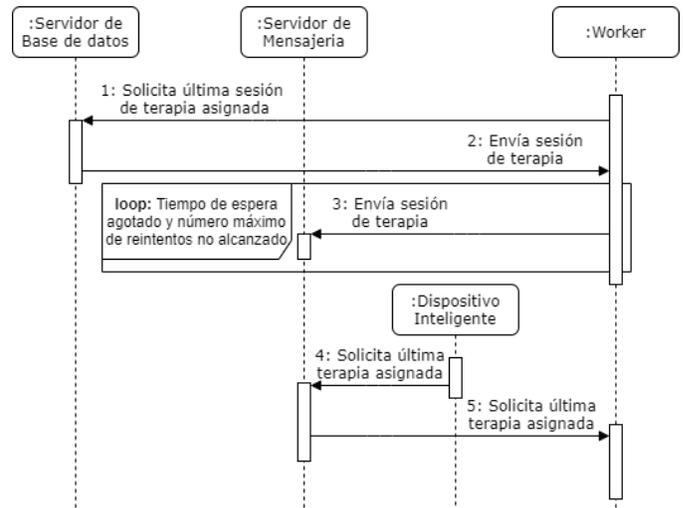


Figura 10: Reintentos Fallidos

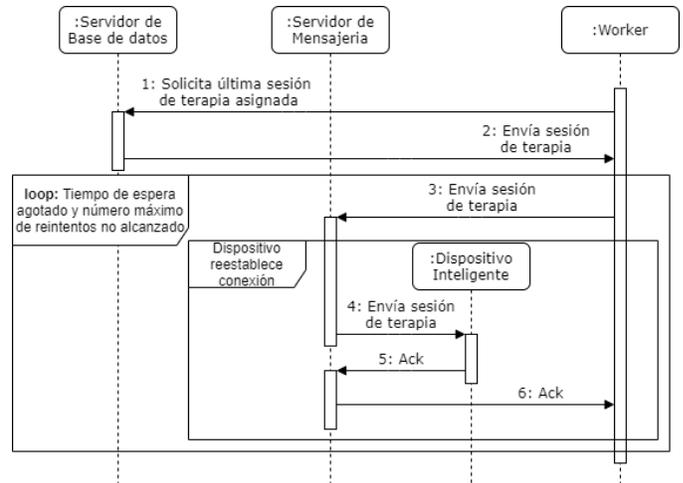


Figura 11: Reconexión Durante Reintentos(1)

luego de la solicitud. En este caso, el dispositivo restablece la conexión mientras el trabajador está reintentando enviar el resultado de la solicitud. Ya que el dispositivo se conecta durante el paso 3 y 4, recibe el resultado de la solicitud y el proceso continúa de manera normal.

4) *Restablecimiento de la Conexión Durante Reintentos(2):* Se expande el escenario anterior, incrementando el tiempo que el trabajador tarda en procesar la solicitud o disminuyendo el tiempo de espera por respuesta del dispositivo “inteligente”. En este caso (ver Figura 12), el dispositivo restablece la conexión durante el proceso de reintentos del dispositivo o durante el procesamiento de la solicitud. El dispositivo, espera un tiempo por la respuesta a su solicitud, pero al no recibirla, la reenvía (paso 4) y es atendida por otro trabajador (paso 5-9). Eventualmente, el dispositivo recibe la respuesta a la solicitud de ambos trabajadores y el flujo finaliza.

Aunque el sistema es capaz de trabajar ante el fallo, varios inconvenientes surgen del mismo:

- El dispositivo recibe la respuesta a su solicitud dos veces. Esto es resuelto por el mismo, ignorando una de las

- [2] World Health Organization, *Reducing Risk, Promoting Healthy Life*, World Health Organization, report, 2002.
- [3] Center for Disease Control and Prevention. *Disability and Health U.S. State Profile Data: Adults 18+ Years of Age*, <https://www.cdc.gov/nbddd/disabilityandhealth/impacts/index.html>
- [4] Instituto Nacional de Estadísticas, *Boletín de Mesa Técnica de Estadísticas de Discapacidad*, INE, reporte, 2014.
- [5] I. Lee and K. Lee, *The Internet of Things (IoT): Applications, Investments, and Challenges For Enterprises*, Business Horizons, vol. 58, no. 4, pp. 431–440, 2015.
- [6] A. Whitmore, A. Agarwal, and L. Xu, *The Internet of Things—a Survey of Topics and Trends*, Information Systems Frontiers, vol. 17, 2014.
- [7] S.M. North, M.M. North and J.R. Coble, *Virtual Reality Therapy: an Effective Treatment for Phobias*, Stud Health Technol Inform, no. 58, pp. 112–119, 1998.
- [8] S. Carlin, G. Hoffman and S. Weghorst, *Virtual Reality and Tactile Augmentation in the Treatment of Spider Phobia: a Case Report*, Behav Res Ther, vol. 2, no. 35, pp. 157–163, 1997.
- [9] G. Kim K. Yoo and J. Im, *A New Rehabilitation Training System for Postural Balance Control Using Virtual Reality Technology*, IEEE Trans Rehabil Eng, vol. 4, no. 7, pp. 482–485, 1999.
- [10] L. Piron, F. Cenni, P. Tonin and M. Dam, *Virtual Reality as an Assessment Tool for Arm Motor Deficits After Brain Lesions*, Stud Health Technol Inform, no. 81, pp. 386–392, 2001.
- [11] J. Fung et al., *Locomotor Rehabilitation in a Complex Virtual Environment*, Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, vol. 4, no. 7, pp. 4859–4861, 2004.
- [12] J. Langan, K. DeLave, L. Phillips, P. Pangilinan, and H. Brown, *Home-Based Telerehabilitation Shows Improved Upper Limb Function in Adults With Chronic Stroke: a Pilot Study*, Journal of Rehabilitation Medicine, vol. 45, no. 2, 2013.
- [13] K.E. Laver, Z. Adey-Wakeling, M. Crotty, N.A. Lannin, S. George and C. Sherrington, *Telerehabilitation Services for Stroke*, Cochrane Database of Systematic Reviews, no. 1, 2020.
- [14] L. Tindall and R. Huebner, *The Impact of an Application of Telerehabilitation Technology on Caregiver Burden*, International Journal of Telerehabilitation, vol. 1, no. 1, 2009.
- [15] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, *The Internet of Things: A Survey*, Computer Networks, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.
- [16] A. Jara, F. Belchi, A. Alcolea, J. Santa, M. Zamora-Izquierdo, and A. Skarmeta, *A Pharmaceutical Intelligent Information System to Detect Allergies and Adverse Drugs Reactions Based on Internet of Things*, 2010 8th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PERCOM Workshops 2010, pp. 809–812, 2010.
- [17] H. Luo, S. Ci, D. Wu, N. Stergiou, and K.C. Siu, *A Remote Markerless Human Gait Tracking for E-Healthcare Based on Content-Aware Wireless Multimedia Communications*, IEEE Wireless Communication, vol. 17, pp. 44–50, 2010.
- [18] G. Nussbaum, *People With Disabilities: Assistive Homes and Environments*, in Computers Helping People with Special Needs, K. Miesenberger, J. Klaus, W. L. Zagler, and A. I. Karshmer, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 457–460, 2006.
- [19] G.H. Khan, A.P. Manwatkar, N.P. Khan, A.D. Bhotmange, and N. Meshram, *Real-time IoT-Based Health Care Monitoring for Prediction and Analysis*, Our Heritage, vol. 68, no. 30, pp. 217–220, 2020.
- [20] V.M. Rohokale, N.R. Prasad, and R. Prasad, *A Cooperative Internet of Things (IoT) for Rural Healthcare Monitoring and Control*, en 2011 2nd International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems Technology (Wireless VITAE), pp. 1–6, 2011.
- [21] P. Verma and S. Sood, *Cloud-Centric IoT Based Disease Diagnosis Healthcare Framework*, Journal of Parallel and Distributed Computing, 2017.
- [22] C. Fernandes and C. Lucena, *A Software Framework for Remote Patient Monitoring by Using Multi-Agent Systems Support*, JMIR Medical Informatics, vol. 5, p. e9, 2017.
- [23] M.C. Domingo, *An Overview of the Internet of Things for People With Disabilities*, Journal of Network and Computer Applications, vol. 35, no. 2, pp. 584–596, 2012.
- [24] N. Bui and M. Zorzi, *Health Care Applications: A Solution Based on the Internet of Things*, in Proceedings of the 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, ISABEL '11. New York, NY, USA: ACM, pp. 131:1–131:5, 2011
- [25] A. Dohr, R. Modre-Osprian, M. Drobnic, D. Hayn, and G. Schreier, *The Internet of Things for Ambient Assisted Living*, Third International Conference on Information Technology: New Generations, pp. 804–809, 2010.
- [26] S. Vukicevic, Z. Stamenkovic, S. Murugesan, Z. Bogdanović, and B. Radenković, *A New Telerehabilitation System Based on Internet of Things*, Facta Universitatis Series Electronics and Energetics, vol. 29, pp. 395–405, 2016.
- [27] B. Ferreira and P. Menezes, *Gamifying Motor Rehabilitation Therapies: Challenges and Opportunities of Immersive Technologies*, Information, vol. 11, no. 02, 2020.
- [28] F. Moreno, J. Ojeda, E. Ramírez, C. Mena, O. Rodríguez, J. Rangel, y S. Álvarez, *Un Framework para la Rehabilitación Física en Miembros Superiores con Realidad Virtual*, Proceedings del I Congreso Nacional de Computación, Informática y Sistemas (CoNCISa), vol. 1, no. 1, pp. 77–84, 2013.
- [29] M. Team. *NoSQL Databases Explained*, <https://www.mongodb.com/nosql-explained>
- [30] M. Team. *Top 5 Considerations when Evaluating NoSQL Databases*, <https://www.mongodb.com/collateral/top-5-considerations-when-evaluating-nosql-databases>
- [31] Facebook. *GraphQL*, <https://graphql.github.io/graphql-spec>
- [32] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, *Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications*, IEEE Communication Surveys and Tutorials, vol. 17, no. 4, 2015.
- [33] S. Vinoski, *Advanced Message Queuing Protocol*, IEEE Internet Computing, vol. 10, no. 6, pp. 87–89, 2006.
- [34] B. Beizer, *Black-Box Testing: Techniques for Functional Testing of Software and Systems*. J. Wiley, 1995.
- [35] S. Bosmans, S. Mercelis, P. Hellinckx, and J. Denil, *Towards Evaluating Emergent Behavior of the Internet of Things Using Large Scale Simulation Techniques*, 2018.
- [36] S. Bosmans, S. Mercelis, J. Denil, and P. Hellinckx, *Testing IoT Systems Using a Hybrid Simulation Based Testing Approach*, Computing, 2018.