

6.1.5. Reflexión

En el capítulo 2, y particularmente en la sección 2.3, se introdujeron los fundamentos del término AIAAS (Artificial Intelligence as a Service), el cual enlaza con lo discutido en la presente sección desde el punto de vista de la definición de estrategias corporativas basadas en IA. Merece la pena reflexionar sobre la idea de ofrecer la IA como el servicio, en comparación de ofrecer un servicio basado en IA.

Las grandes tecnológicas han entendido perfectamente cómo el modelo de negocio de muchas empresas ha cambiado, y no han dudado en ofrecer su infraestructura tecnológica y de comunicaciones para proporcionar servicios transversales como los basados en chatbots, APIs para la computación cognitiva, *frameworks* de aprendizaje automático, e incluso modelos predefinidos para integrarlos en dichos *frameworks*. De nuevo, los datos juegan un papel fundamental en todo este proceso, y se plantean retos como la seguridad, la dependencia con terceras partes, e incluso la transparencia a la hora de conocer lo que ocurre realmente con ellos.

6.2. Modelos de negocio

6.2.1. Introducción

Después de introducir, en la sección 6.1, cómo la IA puede actuar de catalizador para definir la estrategia corporativa de una empresa, la presente sección pone el foco en la generación de modelos de negocio donde la IA juega un papel representativo. En este sentido, se volverá a incidir en cómo el **uso de IA** y de mecanismos basados en **automatización inteligente** está empezando a convertirse, desde el punto de vista práctico, en una obligación.

Posteriormente, en la sección 6.2.3, se abordará un caso de estudio en el que se discute un modelo de negocio basado en el uso de IA. Este caso de estudio está centrado en la creación de una herramienta tecnológica para la rehabilitación física de pacientes afectados por enfermedades neurológicas. Se pretende ilustrar al lector, de forma sintetizada y directa, con algunas de las cuestiones más significativas a la hora de plantear un reto tan ambicioso.

6.2.2. Reinención del modelo de negocio

En el libro *Intelligent Automation* se incluye un análisis muy representativo del impacto que tanto la IA como la automatización inteligente han tenido en los últimos años [BBW21]. Este análisis reflexiona sobre el rendimiento económico de las empresas top del ranking *Fortune 500*, considerando datos del año 2020. En concreto, el elemento que se analiza es el beneficio por empleado, tal y como se muestra en la tabla 6.10.

Posición	Empresa	Beneficio	Empleados	Beneficio por empleado
1	Facebook	18.485 M\$	44.942	411.308 \$
2	Apple	55.256 M\$	137.000	403.328 \$
3	Alphabet	34.343 M\$	118.899	288.842 \$
4	Microsoft	39.240 M\$	144.000	272.500 \$
5	AbbView	7.882 M\$	30.000	262.733 \$

Figura 6.10: Lista de las 5 empresas del ranking *Fortune 500* que más beneficio generan por empleado. Las cantidades económicas están expresadas en dólares americanos. Fuente original: Tipalti, 2020. "Profit per Employee". <https://tipalti.com/profit-per-employee>

Los datos de esta tabla se pueden comparar con los reflejados en la tala 6.11, de nuevo expuestos en el libro *Intelligent Automation* y recogidos por los autores, para reflexionar sobre la correlación existente entre el beneficio por empleado y la antigüedad de la empresa. Como se puede apreciar, el beneficio por empleado descende cuanto más antigua es la empresa.

Fundación	Empresa	Beneficio	Empleados	Beneficio por empleado
1911	IBM	9.431 M\$	383.800	24.573 \$
1940	McDonald's	6.025 M\$	205.000	29.392 \$
1968	Intel	21.048 M\$	110.800	189.964 \$
1975	Microsoft	39.240 M\$	144.000	272.500 \$
1976	Apple	55.256 M\$	137.000	403.328 \$
1998	Alphabet	34.343 M\$	118.899	288.842 \$
2004	Facebook	18.485 M\$	44.942	411.308 \$

Figura 6.11: Lista global de las empresas que más beneficio generan por empleado. Las cantidades económicas están expresadas en dólares americanos. Fuente: Intelligent Automation, 2021 [BBW21].

La principal conclusión que se puede obtener de este análisis es que el funcionamiento de las principales empresas, a nivel global, está cambiando, y este cambio encaja con un **modelo de negocio en el que cada vez intervienen menos empleados**, donde los procesos están cada vez más automatizados y el uso de IA cobra, cada vez más, un mayor protagonismo. Evidentemente, existen otros aspectos a tener en cuenta, como la potencial dificultad de las empresas más asentadas para adaptarse a la transformación digital. Cuando más joven es la empresa, menor es la inercia de la misma con respecto a procesos y estrategias heredadas de épocas donde la digitalización no tenía tanto protagonismo.

Es inevitable pensar que, en los próximos años, todas las empresas evolucionarán hacia un modelo digital donde la automatización y la IA tendrán cada vez más presencia. Además, la intervención humana irá perdiendo peso. Un ejemplo representativo de este cambio es Amazon, que actualmente emplea, aproximadamente, a 400.000 personas y a 200.000 robots. Esto último número asciende más rápido del que lo hace el relativo al personal humano.

En este sentido, los modelos de negocio han de adaptarse a este cambio para que las empresas que los definen sean competitivas. En el siguiente apartado se discute, de manera sintetizada, un caso práctico que trata de ilustrar este cambio en los modelos de negocio.

6.2.3. Caso práctico: rehabilitación remota de ejercicios físicos basada en IA

A continuación, se presenta un caso de estudio en el que se define un modelo de negocio que pivota en torno al **uso de IA para ofrecer una solución tecnológica que permita la supervisión remota de pacientes que requieren rehabilitación física**. Particularmente, se contempla un escenario en el que un terapeuta supervisa, simultáneamente, a varios pacientes afectados por alguna enfermedad neurológica que realizan ejercicios de rehabilitación física desde casa. Tanto la supervisión como la ejecución de ejercicios está guiada por un sistema software basado en IA y en visión por computador. Desde el punto de vista de la monetización, el cliente final es el terapeuta, y no el paciente.

En los siguientes apartados se expone el contexto en el que se encuadra este caso práctico, se detalla el modelo de negocio propuesto, y se discute la arquitectura hardware y software que soporta la funcionalidad disponible tanto para terapeuta como para paciente.

Contexto y problemática

La **rehabilitación física** es una actividad esencial en el proceso de recuperación de varias enfermedades, como las neurológicas, las lesiones físicas o la recuperación tras una intervención quirúrgica. Este caso práctico está contextualizado para el caso de las **enfermedades neurológicas** y, particularmente, para la rehabilitación de personas que han sufrido un ictus. Este se produce normalmente cuando una parte del cerebro se ve repentinamente privada del suministro de sangre. Los pacientes afectados por el ictus quedan con efectos incapacitantes, como la pérdida de fuerza, movilidad o sensibilidad en algunas partes de su cuerpo.

Por lo tanto, la rehabilitación física a largo plazo es necesaria para mejorar su calidad de vida y recuperar la movilidad. Además, el tiempo es un factor crucial, ya que cuanto antes se les trate, mayor será la posibilidad de que los pacientes recuperen algún grado de movilidad [MFP10]. El ictus es una de las principales causas de mortalidad y discapacidad en el mundo, por no hablar de los costes económicos del tratamiento y la recuperación tras el ictus que conlleva [JNR⁺19]. Sólo en la Unión Europea, se estima que el número de personas que sufren un ictus aumentará un 27 % entre 2017 y 2047 [WWE⁺20]. Además, se prevé incluso que este problema se agrave debido al aumento de la edad de las personas mayores, lo que provocará un impacto negativo en los próximos años.

Desafortunadamente, la **problemática** asociada a la rehabilitación física de este tipo de pacientes sigue representando un **reto global** [WWE⁺20] debido, entre otras cuestiones, a la necesidad de llevar a cabo una terapia continuada de rehabilitación durante un periodo de tiempo significativo para recuperar, en la medida de lo posible, la calidad de vida que el paciente gozaba antes de sufrir el ictus.

Por otra parte, en **términos económicos**, hay un gran coste en relación con enfermedades neurológicas. Según el informe anual del informe de 2018 del *National Health Service* británico, y tomando como referencia el Reino Unido, los servicios cuidados curativos y rehabilitación asumieron más de la mitad del gasto sanitario público en 2016, alcanzando los 58.010 millones de euros (57,0 % del gasto sanitario total). En España, como ejemplo particular, el coste medio de un paciente afectado por un ictus se estimó en 27.711€ al año [ASQM⁺17]. Más de dos tercios se deben a los costes sociales. Además, según el informe del Consejo Europeo del Cerebro, más de 179 millones de europeos viven con trastornos neurológicos [DO14]. De hecho, se calcula que 1 de cada 3 sufrirá algún trastorno neurológico o psiquiátrico a lo largo de su vida. Por desgracia, el impacto socio-económico es incluso mucho más acentuado en países de ingresos bajos y medios.

Por lo general, los pacientes con ictus no realizan la rehabilitación solos. En su lugar, cuentan con el apoyo de terapeutas en sesiones cara a cara de forma regular. Esto supone un problema para pacientes cuyo estado de salud les impide asistir a sesiones en el centro de rehabilitación, situación que se ve muy afectada por contextos en los que las restricciones de movilidad pueden impactar (como situaciones de pandemia). Por otra parte, las sesiones de rehabilitación que se ofrecen en los hospitales o centros de rehabilitación a veces no son suficientes para los pacientes, ya que son limitadas en duración. Además, existe una barrera relacionada con la motivación y el compromiso. Los ejercicios físicos tradicionales consisten en realizar ejecuciones repetitivas de movimientos correctos que tienden a ser monótonos y aburridos. Esto puede hacer que los pacientes pierdan la motivación y, en consecuencia, su compromiso con la terapia [JMMG10]. Por desgracia, esto puede afectar a la calidad de la terapia.

Por estos motivos, surge la **telerehabilitación**. Esta rama de la telemedicina permite realizar tratamientos de la fase aguda de la enfermedad sustituyendo las sesiones presenciales tradicionales con una rehabilitación a domicilio (ver figura 6.12). Existe un importante número de aplicaciones bajo este enfoque, generalmente aplicadas a la fisioterapia, donde se utilizan técnicas de realidad virtual (RV) para que el paciente imite los movimientos de un avatar virtual. En esencia, se trata de un enfoque relevante para la rehabilitación en casa. Sin embargo, hay que tener en cuenta que cuando la responsabilidad de realizar estos ejercicios se delega en el paciente, en casa y sin la supervisión directa del terapeuta, la precisión de los ejercicios que se ejecutan puede ser baja, lo que puede afectar a la calidad de la rehabilitación. En este sentido, es posible que no se realicen bien en casa, lo que puede llevar a situaciones no deseadas en las que los efectos de la rehabilitación pueden ser negativos.



Figura 6.12: Representación gráfica del entorno donde el paciente realiza los ejercicios de rehabilitación en casa: (a) TV conectada al dispositivo local de procesamiento. (b) Dispositivo autónomo de seguimiento del esqueleto del paciente. (c) Paciente jugando a un exergame o juego terapéutico.

Modelo de negocio

A continuación, se presenta la descripción de lo que sería la **información fundamental para definir el modelo de negocio** previamente introducido, que gira en torno al **uso de IA para ofrecer una solución tecnológica** orientada a la supervisión remota de pacientes que requieren rehabilitación física. Dicha información, resumida, se estructura en los siguientes puntos:

- Descripción general de la tecnología.
- Análisis de mercado.
- Propiedad intelectual.
- Plan de negocio.
- Aspectos de igualdad, diversidad y ecología.

Descripción general de la tecnología

Se propone una solución tecnológica basada en la nube para la rehabilitación física de pacientes con ictus. La plataforma facilita la gestión clínica a través de la **monitorización activa y la analítica de datos** para el entrenamiento de tareas repetitivas del miembro superior en casa. La interfaz del clínico permite i) definir y asignar rutinas de rehabilitación, ii) monitorizar offline el progreso de los pacientes, e iii) interactuar con ellos a través de videollamada en directo, si es necesario. La interfaz del paciente muestra la terapia prescrita e incorpora elementos de tecnología de juegos para motivar y comprometer a los pacientes.

El paciente sólo necesita un ordenador portátil y un dispositivo que integra un **kit de desarrollo con sensores de inteligencia artificial avanzados** para llevar a cabo la rehabilitación en casa, y la plataforma le guía a través de sencillas instrucciones y pautas de seguridad. La plataforma sigue y mide con precisión el movimiento de las extremidades y proporciona al clínico una medida objetiva del

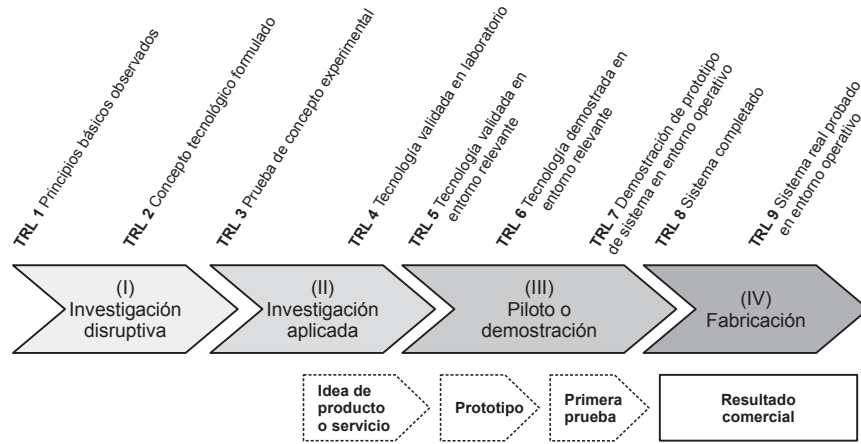


Figura 6.13: Descripción visual de los diferentes niveles de madurez tecnológica TRL (Technology Readiness Levels).

progreso. El clínico puede trabajar con uno o varios pacientes remotos simultáneamente con comunicación audiovisual en directo o sin conexión, en cuyo caso la evaluación del paciente se ve más tarde. El sistema garantiza que se reciba la cantidad de terapia recomendada con un tratamiento de fisioterapia *supervisado* más frecuente y con un coste reducido. Las rutinas de rehabilitación pueden ser personalizadas por el terapeuta.

En cuanto al estado actual de desarrollo, se desarrolló un prototipo² que fue evaluado por clínicos y pacientes, tanto en el Reino Unido como en España. Las pruebas realizadas con pacientes permitieron identificar problemas de usabilidad y accesibilidad. Asimismo, un análisis de mercado indicó las vías de comercialización previas a un ensayo clínico dentro del NHS (National Health Service (UK)). Así, el prototipo desarrollado puede considerarse una prueba de concepto temprana demostrada en el laboratorio (TRL (Technology Readiness Levels) 3). El siguiente ciclo de desarrollo está representado por la plataforma propuesta, que combina las mejoras identificadas con la experiencia adquirida y las características aportadas por el prototipo anterior, y tiene como objetivo el TRL 4/TRL 5 (ver figura 6.13).

Los **resultados esperados como consecuencia de desplegar el modelo de negocio planteado** son los siguientes: i) facilitar el acceso a la tecnología por parte de los pacientes con ictus, ii) incrementar la frecuencia de la fisioterapia *supervisada* por parte de los pacientes con ictus al realizar la rehabilitación en casa, iii) facilitar a los clínicos la supervisión a distancia de múltiples pacientes con ictus, iv) aumentar el tiempo de calidad dedicado por los clínicos a los pacientes con ictus, v) garantizar el compromiso de los sistemas nacionales de salud con la tecnología propuesta.

²<https://www.virtualphysioproject.com/>

Por último, se han identificado una serie de **beneficios** para sistemas nacionales de salud y el mercado en general: i) reducir los costes, ii) llegar a (más) pacientes, especialmente al salir del hospital, iii) aumentar el acceso a la tecnología en las zonas rurales, iv) proporcionar a los fisioterapeutas una tecnología de vanguardia, v) ofrecer una tecnología fácilmente escalable a otras afecciones neurológicas.

Análisis de mercado

En primera instancia, se han analizado decenas de competidores en el mercado, y una de las principales conclusiones obtenidas es que no es fácil tener acceso a los precios. Algunos de los competidores conocidos en estos mercados son, por ejemplo, RGS@home, Neofect, Kaia Health, EvolvRehab, CurvHealth, Rehametrics, Sword Health, Phio, BTS Telerehab, Reactive Rehab, Goodlife Technology, entre otros que han sido descubiertos *online*. Sin embargo, la mayoría de ellas ofrecen soluciones pensadas para centros hospitalarios o de rehabilitación, donde el terapeuta supervisa a los pacientes cara a cara.



Figura 6.14: Paciente haciendo uso de la plataforma EvolveRehab.

Desde el punto de vista de la tecnología empleada, gran parte de los sistemas estudiados utilizan, o han iniciado el proceso de migración, el sistema Azure Kinect DK™ (ver figura 6.15). Este representa la punta de lanza de los dispositivos punteros en lo que se refiere a análisis de imagen y, particularmente, *tracking* o seguimiento de esqueletos.

El hecho de que la competencia ya exista es, en realidad, algo positivo, porque estos *pioneros* han abordado la peor parte: la introducción de un nuevo concepto a las masas, basado en conseguir que la gente lo acepte. Por lo tanto, esta barrera de entrada ya está siendo rota por otros competidores existentes. Al mismo tiempo, el hecho de que haya competidores supone una barrera de entrada evidente, porque no

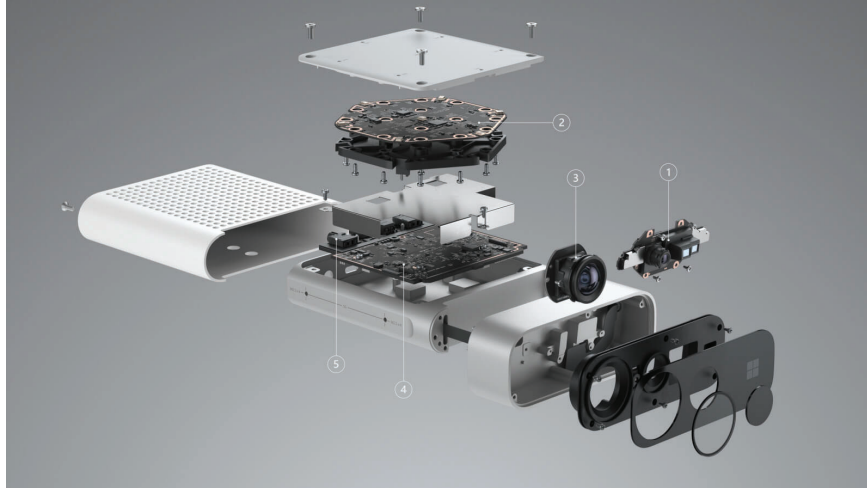


Figura 6.15: (1) Sensor de profundidad de 1 MP con opciones de campo de visión ancho y estrecho. (2) Matriz de 7 micrófonos para capturar sonidos y voz de campo lejano. (3) Cámara de vídeo RGB de 12 megapíxeles para obtener una secuencia de colores adicional en línea con la secuencia de profundidad. (4) Acelerómetro y giroscopio para la orientación del sensor y el seguimiento espacial. (5) Conexiones de sincronización externas para proporcionar sincronización con otros dispositivos Kinect. Fuente: <https://azure.microsoft.com/es-es/services/kinect-dk>

solo es necesario evaluar los precios en función de las soluciones existentes, lo que ha resultado ser duro, sino que además se debe intentar tener algo *disruptivo*. En este contexto, los **puntos de venta únicos de la propuesta basada en el presente modelo de negocio** son los siguientes:

- **bajo coste**, ya que la solución diseñada no depende de dispositivos de hardware cuyo precio sea elevado, más allá del dispositivo de tracking Azure Kinect DK y un PC conectado a Internet,
- **accesibilidad**, ya que el software se basa principalmente en tecnología web y se despliega en la nube,
- **capacidad de personalización**, ya que el sistema facilita la gestión de los ejercicios y los planes de rehabilitación en función del estado y la evolución del paciente. También se pretende orientar esta característica para que la plataforma sea capaz de aprender y adaptar automáticamente la rutina de rehabilitación a cada paciente utilizando IA.

Otras barreras son el hecho de que los usuarios finales son en su mayoría personas mayores y, por lo tanto, supone un gran reto no sólo poder ofrecer una solución lo suficientemente fácil de entender y utilizar para las generaciones mayores.

Propiedad intelectual

Para este caso de estudio se debe considerar que el software no es patentable en Europa. Así, en esta primera aproximación, el trabajo estaría centrado en los aspectos tecnológicos y de validación del modelo de negocio. En particular, se prestaría especial atención a la evaluación preliminar del software, ya que el hardware necesario, como se comentará más adelante, no precisa una validación específica porque no se abordaría un proceso de creación del mismo. Por lo tanto, no se considerará la protección de la propiedad intelectual en relación a potenciales patentes.

Sin embargo, y como se ha mencionado anteriormente con respecto a la capacidad de personalización, consideramos la integración de la IA y, particularmente, de una versión preliminar de un algoritmo de aprendizaje automático que sentará las bases de este módulo funcional. Este será un resultado que podrá ser considerado para una futura protección de la propiedad intelectual.

En cuanto a la gestión de la propiedad intelectual, el sistema combina algoritmos de código abierto (bajo licencias que permiten comercializar los resultados) y propietarios. Se optaría por la denominada *publicación defensiva* (*defensive publishing*). Así, se optaría por la generación y publicación de un *white paper*, con contenido técnico, que reflejaría los aspectos más representativos del software y, en concreto, del módulo de personalización individualizada de rutinas.

Plan de negocio

Con respecto a la **comercialización** y el plan de negocio, la primera etapa se podría basar en una **fase de pre-venta** en la que se define un precio bajo, o con descuento, para establecer una relación estrecha con un conjunto selecto de clientes. Esta estrategia estaría planteada con un doble objetivo: i) refinar y validar el prototipo software generado y ii) generar una sensación de exclusividad que facilitara el aterrizaje de los primeros clientes. Es importante destacar la necesidad de generar un flujo de caja en efectivo que permita financiar la mejora del primer prototipo software generado, particularmente todo aquello relacionado con la experiencia del usuario.

Para llegar a estos clientes iniciales, se realizaría una **inversión en redes sociales** y se contactaría directamente con terapeutas que trabajen en clínicas donde el componente tecnológico y de innovación sea representativo. Esta primera etapa del plan de negocio, estimada con una duración de 6 meses, sentaría las bases para lanzar el producto final y planificar diferentes estrategias de marketing, como anuncios en línea y la contratación de vendedores para llegar a los clientes directamente.

Con respecto a la **segmentación del mercado y estrategia de precios**, el mercado principal está claramente definido, ya que estaría centrado en clínicas de fisioterapia y los fisioterapeutas, en general. Los precios calcularían en base a los pocos competidores identificados en la fase de análisis de mercado, aunque no se ha podido identificar un precio concreto para una plataforma basada en servicios (SAAP (Service-As-A-Platform)). Esta situación complica la definición adecuada de un precio inicial.

Con respecto a **posibles barreras de adopción de la tecnología propuesta**, el principal reto es la fragmentación o dispersión de las entidades dedicadas a la rehabilitación física. En definitiva, hay que dirigirse a cada organización por separado. Por otro lado, se considera la situación en la que los fisioterapeutas son reacios a utilizar una nueva tecnología, debido a la falta de confianza en el uso de la misma y el miedo a que les sustituya o incluso sean prescindibles en su trabajo. Finalmente, también es importante considerar la potencial barrera tecnológica en la que los pacientes podrían reflejar que no tienen confianza en la tecnología propuesta.

En relación a la **capacidad de atraer clientes y generar confianza** con respecto a este primer prototipo software, se llevo a cabo una fase inicial de trabajo con médicos y supervivientes de accidentes cerebrovasculares. Particularmente, se organizaron eventos de consulta a los que asistieron neurólogos consultores del NHS en el Reino Unido, consultores en medicina de rehabilitación, fisioterapeutas y terapeutas ocupacionales. Los objetivos de estos eventos fueron comprender las necesidades clínicas, las vías de atención y las condiciones de interés. Los comentarios de los médicos fueron positivos. Se reclutó a supervivientes de accidentes cerebrovasculares para evaluar la versión preliminar del prototipo software actual desde el punto de vista de la usabilidad. Los comentarios recogidos de los supervivientes de accidentes cerebrovasculares se registraron mediante cuestionarios de salud estandarizados. Los comentarios fueron en general positivos, con sugerencias para mejorar la usabilidad.

Aspectos de igualdad, diversidad y ecología

El modelo de negocio planteado considera tres áreas de desigualdades sanitarias sobre las que incide la tecnología planteada: i) el estado de salud, por ejemplo, para mejorar la calidad de vida y los resultados con una terapia supervisada de forma más frecuente, ii) el acceso a la atención sanitaria, que permite a más pacientes acceder a la fisioterapia durante más tiempo, y iii) la calidad y la experiencia de la atención, mejorando la experiencia y la satisfacción del paciente con una interacción a medida entre el paciente y el sistema.

La tecnología puede contribuir directamente a **reducir las desigualdades en materia de salud** al permitir una rehabilitación de bajo coste en casa. Los estudios demuestran que los supervivientes de accidentes cerebrovasculares no reciben la cantidad recomendada de fisioterapia por razones como los costes y la accesibilidad, así como la propia escasez de fisioterapeutas, con carácter general. La tecnología planteada ofrece una opción de bajo coste para su uso en el entorno doméstico sin banda ancha de alta velocidad (descarga e instalación única de software).

Visión general de la arquitectura hardware/software

El modelo de negocio que previamente se ha introducido es el que se utilizará como referencia para discutir la arquitectura hardware y software propuesta para construir un potencial MVP (Minimum Viable Product).

En primer lugar, se abordará la dimensión hardware, que se puede apreciar de forma visual en la figura 6.16. A continuación se listan, y justifican brevemente, las **decisiones tomadas para diseñar el sistema hardware de rehabilitación remota**:

- Se ha optado por utilizar el dispositivo Azure Kinect DK, un dispositivo hardware que incorpora sensores avanzados para realizar el seguimiento del esqueleto del usuario y que está integrado con modelos de voz y visión artificial. Para utilizar el SDK de seguimiento de personas³, es necesario conectar el dispositivo a un equipo con un controlador gráfico Nvidia, de forma que se pueda hacer uso de hardware específico para llevar a cabo un *tracking* adecuado. Aunque existen otros dispositivos de *tracking* que no imponen este tipo de condicionantes, se establece como requisito no funcional la realización de un seguimiento de calidad, y para ello Azure Kinect DK representa la solución más avanzada.
- El diseño de caja negra, que incluye un botón para encender y apagar el equipo, junto con una pequeña pantalla de visualización en el panel frontal, tiene como objetivo reducir al máximo la complejidad a la hora de interactuar con el prototipo. La caja integra una salida de vídeo por HDMI para que sea posible conectar el equipo a un monitor externo (o a la televisión del salón).
- La caja negra también incorpora una clavija para conectar el equipo a la red eléctrica mediante un cable estándar. Esta conexión dota de alimentación al mini-PC que integra la tarjeta gráfica Nvidia, el cual, a su vez, sirve para alimentar al dispositivo de *tracking* mediante una conexión USB.

Por otra parte, y con respecto a la **dimensión software del prototipo** planteado en relación al modelo de negocio diseñado, la figura 6.17 muestra la **interfaz gráfica** generado con el motor de videojuegos multiplataforma Unity™. A continuación, se listan las principales decisiones tomadas a la hora de abordar dicho diseño:

- El avatar virtual sirve para que el usuario sepa cómo está moviendo su cuerpo, en todo momento, cuando efectúa la rehabilitación física. En la figura 6.17 se muestra cómo la parte relevante para realizar el ejercicio planteado es la mano, remarcada en rojo.
- El esquema de interacción es muy sencillo, y se basa en llevar a cabo colisiones de la parte del cuerpo marcada en rojo con las diferentes esferas virtuales que conforman la trayectoria de un ejercicio. Estas están numeradas para facilitar que el usuario sepa por dónde debe mover una determinada articulación. Se considera el concepto general de restricción, que permite asociar una articulación con otras, para que el usuario ejecute los ejercicios con la técnica adecuada. A modo de ejemplo, se considera que sería posible indicar que la cadera debe estar fija cuando se mueve el brazo.

³<https://docs.microsoft.com/es-es/azure/kinect-dk/body-sdk-download>

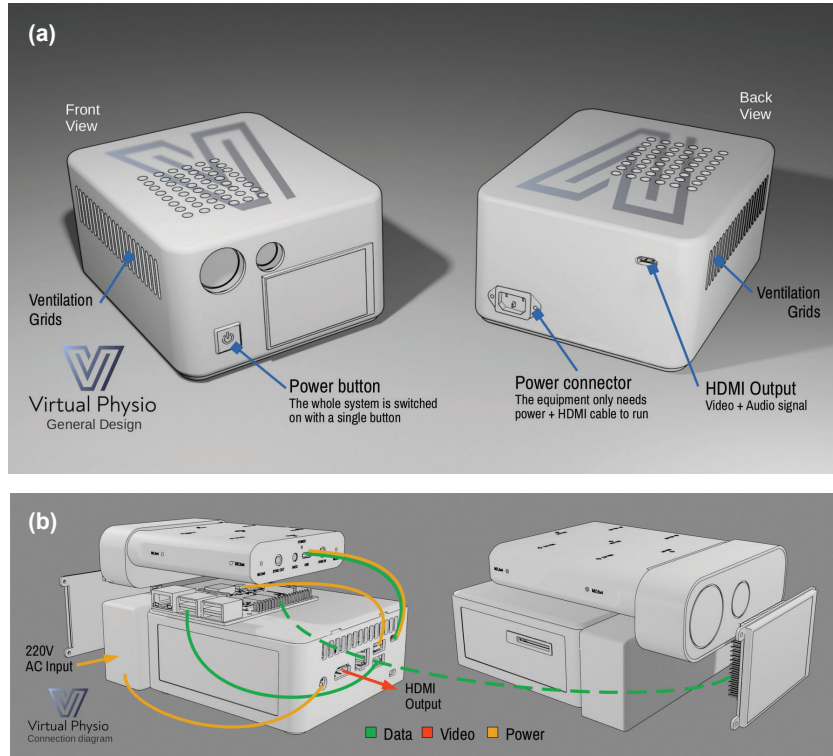


Figura 6.16: Prototipo hardware para la rehabilitación remota en casa. a) Diseño de una *caja negra* que integra los componentes físicos necesarios para desplegar el sistema software. b) Interior del prototipo, en el que se muestra el dispositivo de *tracking* Azure Kinect DK conectado a un mini-pc que ejecuta el software.

- Además de ofrecer una interfaz basada en mecanismos naturales de interacción, ya que el sistema detecta el movimiento del usuario sin la necesidad de sensores físicos, el prototipo posibilita la interacción mediante comandos de voz. De hecho, en la parte superior derecha de la interfaz aparecen algunos de los comandos más frecuentes, y que el sistema es capaz de reconocer cuando el usuario los emite. En la parte superior de la interfaz aparece un *vúmetro* visual para ofrecer *feedback* al usuario cuando está hablando.
- El prototipo muestra información básica asociada a la ejecución de una rutina, como el ejercicio en curso, el número de repeticiones, la puntuación y el tiempo. Estos últimos se aprecian en la parte izquierda de la figura 6.17.

La figura 6.18 muestra, de manera resumida, la arquitectura interna del prototipo software para la rehabilitación remota desde una perspectiva de **flujo de información** entre módulos. Esencialmente, se distinguen tres grandes pasos:

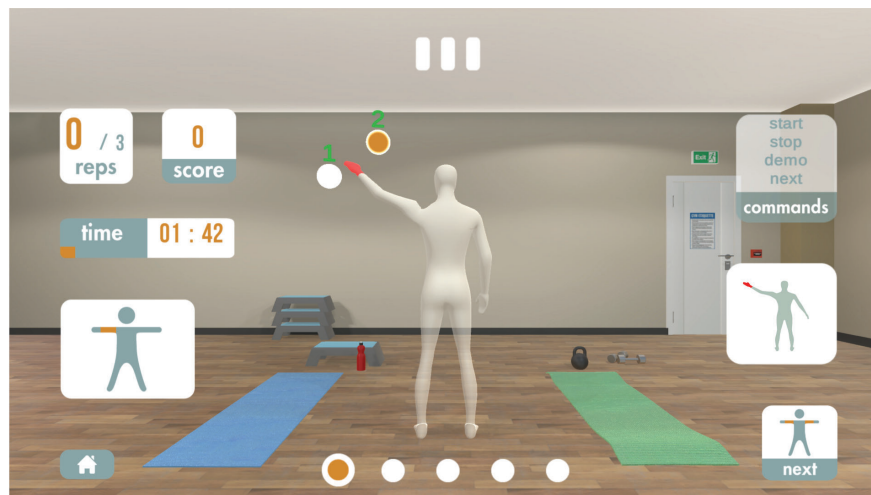


Figura 6.17: Interfaz gráfica del prototipo software para la rehabilitación remota en casa.

1. Captura de datos. El sistema obtiene y serializa los datos de *tracking* del esqueleto del usuario junto con los potenciales comandos de voz reconocidos. En realidad, los datos de *tracking* recogen las posiciones y orientaciones de las articulaciones del cuerpo del paciente en el espacio 3D.
2. Procesamiento de información. El sistema evalúa si el paciente está realizando correctamente el ejercicio de rehabilitación planteado, considerando el esquema de interacción previamente introducido y que se basa en la colisión de articulaciones con esferas virtuales. En este punto, el sistema gestiona aspectos de motivación mediante el uso de gamificación. Por ejemplo, el sistema generará un efecto visual y reproducirá una notificación sonora cuando el usuario ha sido capaz de completar una parte del ejercicio.
3. Visualización de información. El sistema ofrece *feedback* al usuario, de forma que este sepa cómo está realizando la rutina de rehabilitación asignada. Este *feedback* contiene aspectos como la puntuación, barras de progreso para ver la evolución temporal y desbloqueo de logros conforme el proceso avanza.

Desde el **punto de vista de integración de IA**, el sistema software permite habilitar un módulo para llevar a cabo tanto evaluaciones como clasificaciones automática de ejercicios físicos. Este enfoque dista del utilizado por defecto por el sistema, y que se ha simplificado de acuerdo a un mecanismo de interacción entre las articulaciones del paciente y la definición explícita de trayectorias virtuales que recrean ejercicios de rehabilitación.

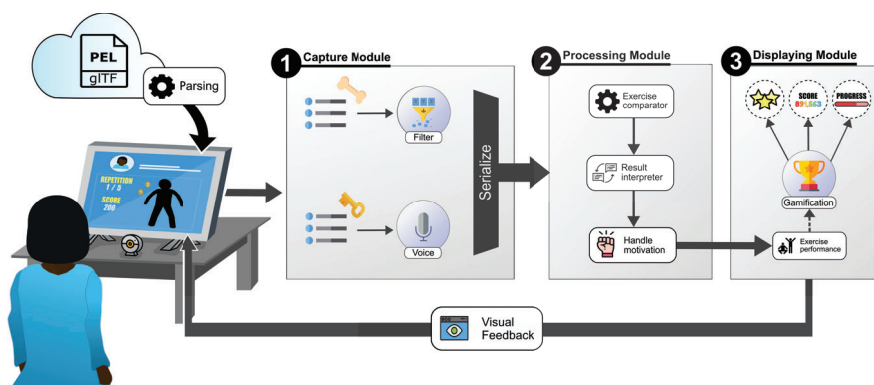


Figura 6.18: Principales módulos funcionales de la arquitectura interna del prototipo de rehabilitación remota, visualizados desde el punto de vista del flujo de información entre ellos.

Así, sería posible habilitar un modo de funcionamiento en el que **el sistema compara, automáticamente, el ejercicio del paciente**, en su conjunto, con la ejecución del mismo ejercicio realizada, de manera correcta, por un terapeuta. Para ello, el sistema implementa una variable del algoritmo DTW (Dynamic Time Warping), el cual posibilita la comparación de ejercicios que pueden variar en términos de velocidad. En otras palabras, si el paciente realiza correctamente un ejercicio de rehabilitación pero de forma más lenta en comparación con el *gold standard* (que es el ejercicio de referencia realizado por el terapeuta), el sistema será capaz de detectar que se trata del mismo movimiento, aislando la dimensión temporal. Este planteamiento resulta adecuado en el ámbito de la rehabilitación de pacientes afectados por accidentes cerebrovasculares, como ictus, especialmente en sus primeras etapas.

Particularmente, en el prototipo software se contempla una variante del algoritmo DTW, la versión FastDTW [SC07], que ofrece un orden temporal lineal de complejidad para analizar y evaluar automáticamente los ejercicios realizados por el paciente. El algoritmo proporciona la alineación óptima de dos secuencias temporales calculando una matriz de costes obtenida a partir de la diferencia entre dos índices de puntos de datos en las secuencias. El algoritmo elimina la dimensión temporal, proporcionando así resultados independientes de la diferencia de tiempo entre las dos secuencias. Esto lo hace especialmente útil para comparar series temporales, como el reconocimiento de voz y la sincronización de audio.

El movimiento vinculado a un ejercicio consiste en un conjunto de puntos marcados en el tiempo, uno por cada una de las articulaciones implicadas en el movimiento (ver la parte izquierda de la figura 6.19). Cada serie es una secuencia temporal de 3 tuplas $(x, y, z) \in R^3$, que indican la posición de la articulación asociada a la serie en un instante determinado, obtenida de la cámara del sensor de profundidad. Los valores de cada eje representan la posición de la articulación a lo largo del tiempo en ese eje y pueden verse como una trayectoria o curva. De este modo, el problema de la comparación de movimientos puede verse como un

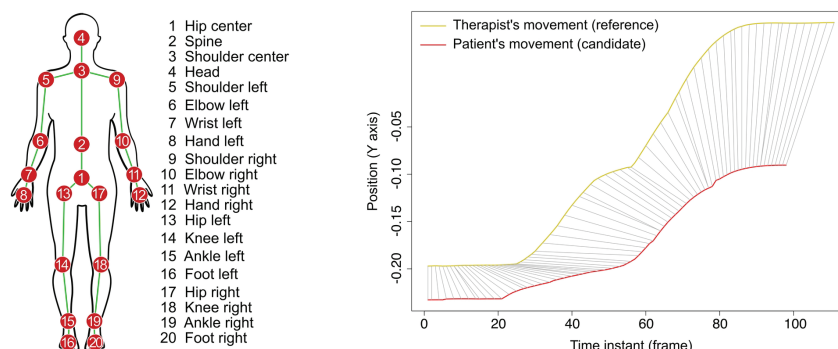


Figura 6.19: A la izquierda, el conjunto de articulaciones detectadas por la cámara de profundidad del dispositivo de *tracking*. A la derecha, representación visual de la comparación de una articulación a lo largo del eje Y.

problema de comparación de series temporales. El algoritmo DTW permite comparar dos series temporales midiendo la similitud entre dos secuencias temporales, que pueden variar en velocidad, es decir, independientemente de la diferencia de tiempo entre las dos secuencias.

La parte derecha de la figura 6.19 muestra dos curvas generadas a lo largo del eje Y para la articulación del codo derecho (punto 10 del esqueleto de la figura 6.19) durante un ejercicio en el que se levanta el brazo derecho. La curva discontinua corresponde al movimiento realizado por el terapeuta (ejercicio de referencia), mientras que la curva continua corresponde al del paciente (ejercicio a comparar). La alineación de ambas curvas obtenida tras la aplicación del algoritmo DTW (distancia = 5,2) está representada por los segmentos que unen las curvas. Este valor indica la distancia entre las dos curvas, por lo que cuanto más se acerque este valor a 0, mayor será la similitud entre los dos ejercicios, y menos diferencias significativas existirán entre las dos curvas. Este valor de distancia es calculado por el algoritmo utilizando como métrica la distancia euclídea entre las curvas.

La comparación, a nivel de ejercicio, se realiza comparando las curvas en los ejes X, Y y Z de los movimientos realizados por el paciente r y el movimiento del terapeuta m en cada uno de los puntos del esquema articular (puntos 1 a 20 de la figura 6.19) implicados en el movimiento, aplicando el algoritmo DTW a cada articulación independientemente. Para cada serie, es decir, para cada movimiento de una articulación i en el ejercicio se obtiene una distancia que considera las distancias en los ejes X, Y y Z de esa articulación; esta distancia se anota como d_{DTW_i} .

En el sistema planteado, la distancia total entre el ejercicio realizado por el paciente y el realizado por el terapeuta se calcula como la media aritmética de las distancias asociadas a las articulaciones que se utilizan en un ejercicio determinado.

Por otro lado, en el sistema propuesto, el paciente debe seleccionar el ejercicio a realizar, mediante comandos de voz o la interfaz de usuario. La interfaz de voz o táctil puede no ser adecuada para los pacientes con una discapacidad física o cognitiva más grave. Así, se requiere un mecanismo que elimine la necesidad de que el paciente seleccione y realice el ejercicio de manera explícita.

El algoritmo DTW estándar opera sobre series temporales finitas, es decir, sobre un ejercicio completado. El Open-End DTW (OE-DTW) de Tormene et al. [TGQS09], una variante de DTW, permite la **comparación sobre series temporales incompletas**. Proporciona el porcentaje de coincidencia entre dos curvas en cada instante de tiempo de la serie. Esta característica puede utilizarse para permitir que la comparación comience tan pronto como se detecte el movimiento y continúe, de modo que no sea necesario seleccionar manualmente un ejercicio. Además, el algoritmo OE-DTW puede utilizarse para identificar el ejercicio realizado por el paciente comparando la serie temporal generada con toda la referencia predefinida. A medida que el ejercicio progresa, se recogen más datos para establecer una comparación más informada.

En un funcionamiento normal, el paciente iniciaría el movimiento del ejercicio que desea realizar y el sistema detectaría el ejercicio que se está realizando. Para ello, el sistema compara periódicamente las posiciones de las articulaciones con las almacenadas para los ejercicios de referencia existentes. Cuando se encuentra un candidato óptimo, el ejercicio correspondiente a ese candidato se marca como definitivo y al completar el ejercicio se informa al paciente de su realización. Se considera que un candidato óptimo es el ejercicio de referencia que minimiza la distancia entre la trayectoria articular del paciente y la referencia, tal y como indica el algoritmo OE-DTW.

6.2.4. Caso práctico: MediaPipe Pose con Python

En caso práctico basado en IA para la rehabilitación remota existe una dependencia significativa en términos de hardware: el uso de Microsoft Azure Kinect DK como dispositivo de tracking que, a su vez, implica usar un equipo con una tarjeta gráfica dedicada con unas características especiales. Afortunadamente, existen **otras soluciones disponibles que permiten construir prototipos software con la misma base funcional sin sacrificar en exceso el rendimiento y la precisión**. Una de estas opciones es **MediaPipe**⁴.

MediaPipe se define como un sistema multi-plataforma que ofrece soluciones basadas en aprendizaje automático para procesar datos multimedia procedentes de fuentes de *streaming*. MediaPipe mantiene una licencia Apache 2.0, la cual facilita la utilización de esta herramienta tanto en proyectos open-source como en proyectos comerciales.

⁴<https://mediapipe.dev/>