

SISTEMA INTEGRADO PARA LA ASISTENCIA DE FISIOTERAPIA EN EXTREMIDADES SUPERIORES

Realizado por:
Ing. Enmler González / Correo: enmlergonzalez@gmail.com
Ing. Guillermo Quintero / Correo: guillermoquintero.gl10@gmail.com
Ing. Diego Rodríguez / Correo: diegojro14@gmail.com

Tutor Académico:
Dr. Luis Montiel / Correo: lnmontiel@urbe.edu.ve

Tutor Metodológico:
Dra. María Paz / Correo: mapaz1@urbe.edu.ve

La fisioterapia ha evolucionado de técnicas empíricas y manuales hacia la integración de tecnologías avanzadas para optimizar la rehabilitación funcional. A pesar del surgimiento de innovaciones como los exoesqueletos robóticos, el acceso a estos sistemas sigue siendo limitado debido a los altos costos de inversión y la necesidad de personal altamente calificado, lo que profundiza la brecha tecnológica sanitaria. En el contexto de Latinoamérica, y específicamente en

Venezuela, la situación es crítica: la escasez de profesionales, la falta de instalaciones óptimas y la desatención de los servicios de rehabilitación, muchas veces relegados por no ser considerados de riesgo vital, obligan a los pacientes a recurrir a procedimientos no supervisados o a abandonar sus tratamientos por falta de recursos. Ante esta realidad, surge la necesidad de desarrollar un Sistema Integrado para la asistencia de fisioterapia en extremidades superiores, diseñado para automatizar ejercicios guiados, monitorear la evolución de las lesiones de manera objetiva y asistir a los profesionales de la salud, permitiéndoles atender a múltiples pacientes de forma eficiente

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

El presente documento expone la síntesis arquitectónica y clínica del sistema robótico de asistencia fisioterapéutica para miembros superiores, diseñado bajo una metodología híbrida de diez fases. Como Ingeniero Biomédico Senior y Arquitecto de Sistemas, este reporte técnico detalla la integración de protocolos médicos avanzados con una infraestructura de hardware y software robusto, orientada a la recuperación funcional y la precisión diagnóstica.

La génesis del proyecto se fundamentó en un análisis interdisciplinario mediante entrevistas con especialistas en traumatología, fisioterapia e ingeniería electrónica. Esta etapa permitió alinear las capacidades mecánicas con las necesidades patológicas reales.

Análisis Clínico y Metas de Recuperación

El traumatólogo identificó condiciones críticas que el sistema debe asistir:

- Hombro: Fracturas proximales de húmero, lesiones del manguito rotador, artrosis glenohumeral, síndrome de hombro congelado y pseudoparálisis.
- Codo: Fracturas de olecranon, supracondíleas de húmero, de cabeza de radio y la "triada terrible" de codo.

Desde la perspectiva fisioterapéutica, el progreso se cuantifica mediante la Escala MRC y la Escala de Daniels (grados 0 a 5). Se determinó que el sistema debe soportar protocolos de "movilidad precoz", como los movimientos pendulares (inicio en la 4ta semana) y la terapia tipo arañas (desde la 8va semana hasta los 90° de abducción), escalando hasta los 180° tras la 10ma semana.

En cuanto a la justificación Técnica y Control de Trayectoria, la arquitectura no se limita a un movimiento lineal; requiere un control de trayectoria complejo para replicar los protocolos mencionados. El sistema exige rangos de movimiento (ROM) variables y un control de fuerza

adaptativo para asistir extremidades flácidas sin comprometer la integridad de tejidos en cicatrización.

Mediante la observación directa y el muestreo de trabajo en entornos clínicos, se derivaron requisitos que no interfirieran con la práctica natural del terapeuta. Los criterios de diseño críticos incluyeron: la precisión milimétrica del movimiento, la repetibilidad para la reeducación neuromuscular, la ergonomía ajustable mediante componentes telescópicos y, primordialmente, la seguridad del paciente a través de redundancia en los límites de control.

La lógica operativa garantiza un flujo de datos determinístico. El sistema monitorea variables críticas: tiempo de sesión, repeticiones ejecutadas y el estatus de finalización. Como se detalla en el [Figura 1], el flujo describe un ciclo cerrado donde la configuración del terapeuta viaja desde la interfaz web hacia el microcontrolador ESP32 para la activación de actuadores, retornando los resultados hacia el registro histórico para la generación de reportes clínicos.

Como Arquitecto de Sistemas, se definió una estructura modular para mitigar riesgos de falla y asegurar la escalabilidad:

Cerebro del Sistema: Se seleccionó el microcontrolador ESP32, configurado específicamente como un servidor web local. Esta decisión técnica elimina la dependencia de internet externo, garantizando la operatividad en entornos hospitalarios con conectividad restringida.

Gestión y Persistencia: El backend utiliza PHP y MySQL para una gestión de datos relacional y eficiente.

Interconexión de Bloques: La comunicación entre el frontend, el backend y los actuadores mecánicos se visualiza en el la Figura 1, asegurando una latencia mínima en la ejecución de comandos.

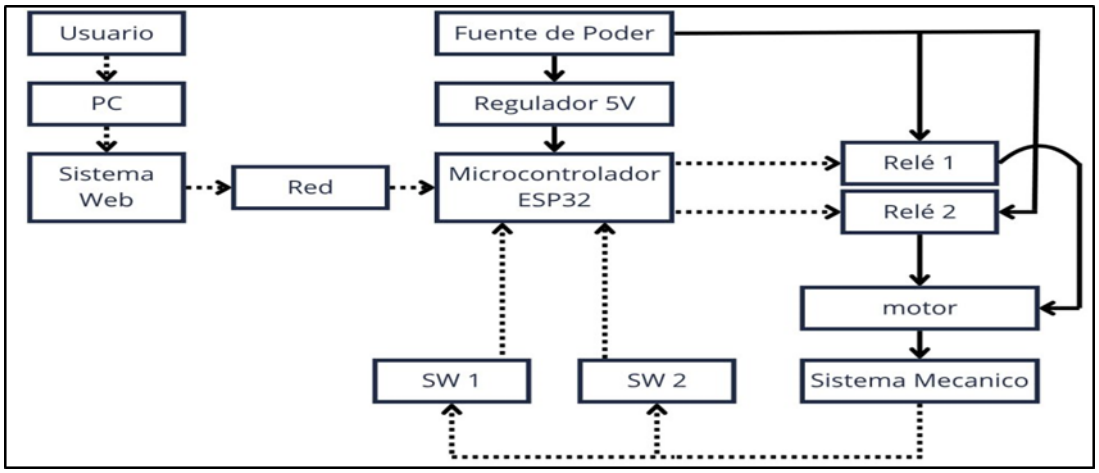

Figura 1 Diagrama de flujo del sistema
Fuente: González, Quintero, Rodríguez (2025)

El diseño integra una infraestructura de datos estructurada en phpMyAdmin y un esquema de control de potencia robusto.

En relación a la Infraestructura de Datos (Reglas de Negocio), la base de datos implementa una regla de integridad crítica: el campo "Peso" en la tabla 1 de Sesiones es exclusivo para ciertos protocolos y permanece nulo en rehabilitaciones estándar.

Tabla 1. Función Técnica

Tabla	**Función Técnica**
Pacientes	Datos demográficos y trazabilidad de ingresos.
Terapeutas	Gestión de credenciales, especialidad y número de licencia profesional.
Usuarios	Control de acceso basado en roles (Admin/Terapeuta) y seguridad de credenciales.
Sesiones	Registro de parámetros físicos (series, tiempo) y observaciones clínicas.

Fuente: González, Quintero, Rodríguez (2025)

El control bidireccional del motor DC se implementa mediante un puente H configurado con relés, permitiendo la elevación y el descenso controlado. El diseño validado en la Figura 2 incorpora pulsadores como finales de carrera, los cuales actúan como una interrupción de hardware inmediata, garantizando que el sistema nunca exceda los límites anatómicos predefinidos, incluso ante fallos de software.

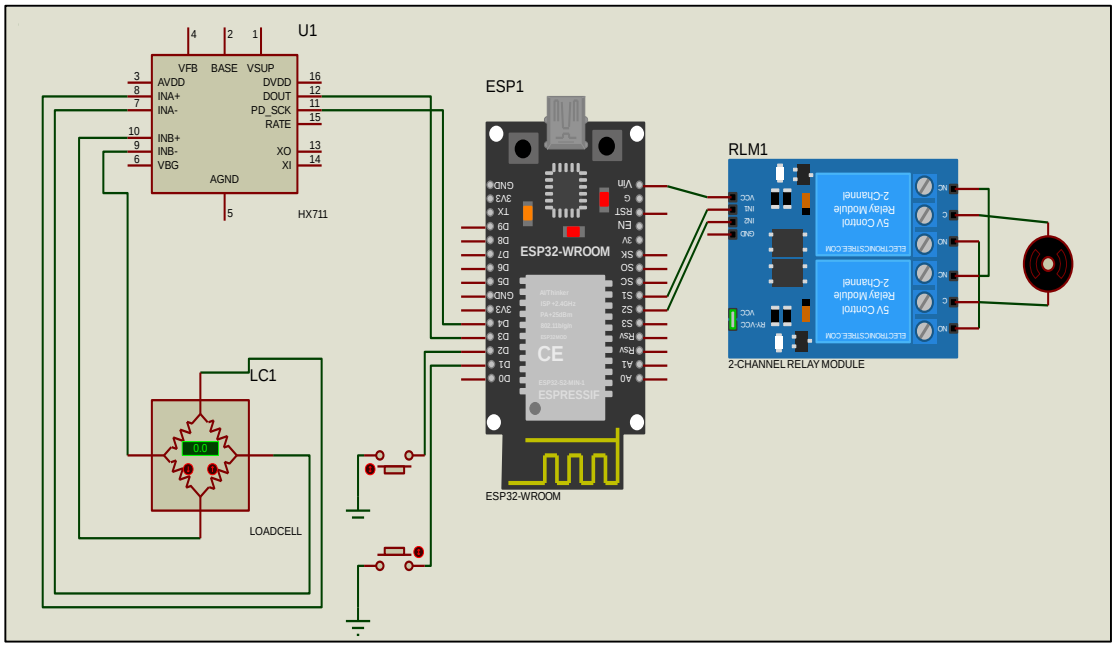

Figura 2: Diagrama eléctrico
Fuente: González, Quintero, Rodríguez (2025)

Programado en Arduino IDE, el software del ESP32 gestiona la interfaz del dashboard. El diseño de la interfaz prioriza la reducción de la "brecha tecnológica", mitigando la curva de aprendizaje para el personal de salud. El sistema permite una visualización diferida de datos, liberando al fisioterapeuta de la necesidad de un monitoreo presencial constante, optimizando así el flujo de trabajo clínico.

El prototipo físico es una síntesis de resistencia y ergonomía biomecánica.

- Mecánica de Elevación: Se implementó un mecanismo de brazos cruzados (tipo tijera) accionado por un motorreductor DC de alto par. Una especificación clave es la transmisión mediante dos piñones, vital para la entrega de torque uniforme.
- Estructura y Rango: La base telescópica de 30 cm, ilustrada en la Figura 3, soporta un rango angular de 315° (reposo) a 45° (extensión máxima).

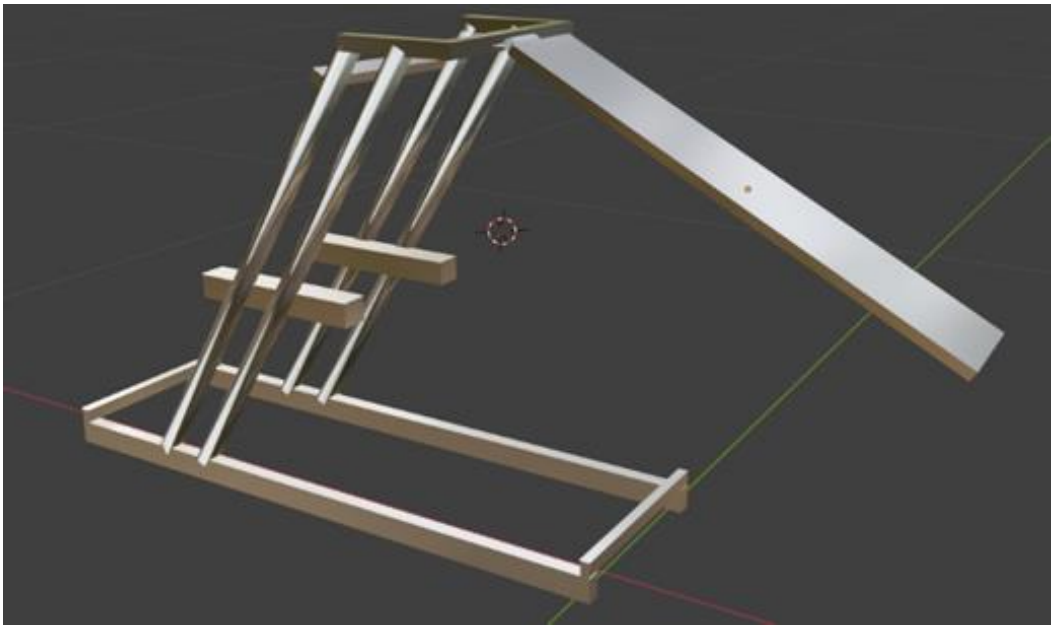

Figura 3: Base del Prototipo diseñado en Blender 3D
Fuente: González, Quintero, Rodríguez (2025)

- Entorno de Control: El dashboard del fisioterapeuta, visible en la Figura 4, integra una cuenta regresiva y un botón de parada de emergencia (STOP) de alta visibilidad, que actúa como el primer nivel de seguridad mecánica.



Figura 4: Dashboard Fisioterapeuta

Fuente: González, Quintero, Rodríguez (2025)

Se aplicaron protocolos de Verificación y Validación (V&V) para asegurar la integridad operativa:

- Validación de Acceso: Verificación estricta de roles y permisos de base de datos.
- Ejecución de API: Pruebas de consistencia de datos entre el hardware y el reporte final.
- Integración de Hardware: Calibración precisa de los ángulos de elevación y validación de la respuesta de los finales de carrera.
-



Figura 5: Modulo Gestión de Terapeutas.
Fuente: González, Quintero, Rodríguez (2025)

La implementación administrativa se evaluó a través de módulos de gestión que garantizan la trazabilidad total del paciente. En la Figura 5, se observa el módulo de gestión de terapeutas, donde se administran licencias médicas y especialidades, vinculando unívocamente a cada profesional con su historial de tratamiento, facilitando auditorías y el seguimiento del éxito terapéutico basado en datos cuantitativos.

El cierre del proyecto se centró en la optimización de la seguridad pasiva y la entrega de activos técnicos. Seguridad y Confort: Se implementó un sistema de inmovilización de la extremidad con polímeros de grado médico y materiales biocompatibles, visibles en la Figura 16], para prevenir compensaciones musculares y garantizar la estabilidad durante la sesión.

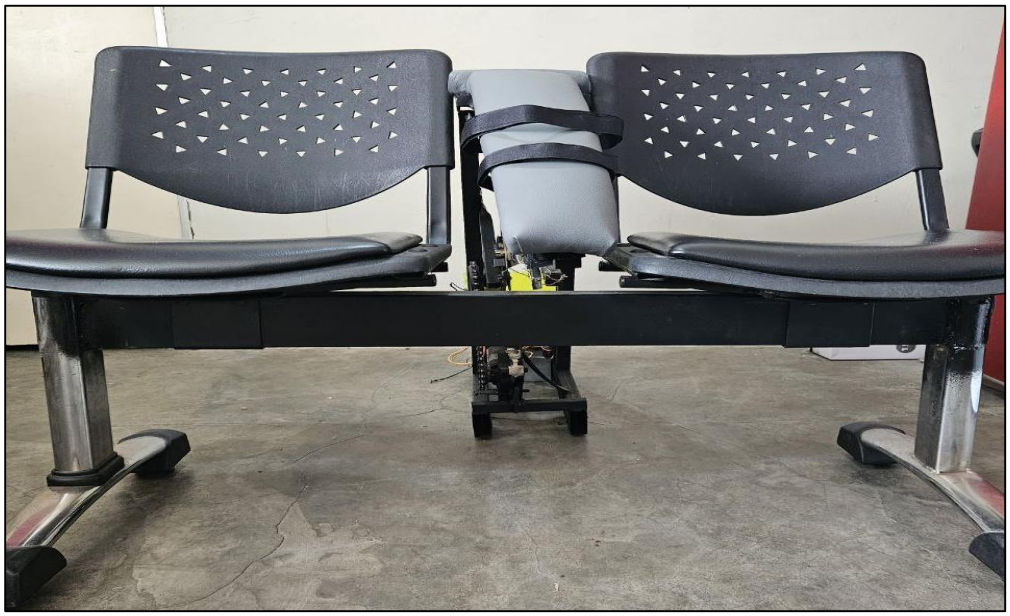

Figura 16: Confort y seguridad.
Fuente: González, Quintero, Rodríguez (2025)

Entregables Finales:

- Manual de Usuario: Documento intuitivo orientado a reducir la barrera de adopción tecnológica.
- Material Multimedia: Video de 2:12 minutos con una estructura profesional: Objeto de estudio -> Problema -> Objetivos -> Fases -> Prototipo -> Conclusiones.
- Identidad Visual: Logotipo diseñado con el acrónimo del proyecto, integrado en toda la interfaz y documentación técnica.

Este sistema representa una solución arquitectónica madura que cierra la brecha entre la ingeniería robótica y la rehabilitación clínica efectiva.

CONCLUSIONES

La investigación cumplió exitosamente con el objetivo de diseñar y construir un prototipo robótico para la asistencia de fisioterapia en extremidades superiores, aplicando una metodología estructurada de diez fases. El sistema permite a los terapeutas programar protocolos de rehabilitación personalizados con rangos de movimiento (ROM) y fuerzas variables, transformando métricas clínicas en datos cuantitativos para un monitoreo objetivo.

El desarrollo integró una arquitectura modular de hardware ligero y un software con interfaz intuitiva que gestiona los movimientos y registra datos en tiempo real. Finalmente, las pruebas técnicas confirmaron la precisión, seguridad y funcionalidad del dispositivo, estableciendo una base robusta para la innovación en fisioterapia asistida y mejorando potencialmente la calidad de vida de los pacientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2021). "**Fundamentos de circuitos eléctricos**" 7ma Editorial. Editorial, McGraw-Hill.

Arias, F. G. (2012). "**El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica**" 6ta Edición. Editorial Episteme.

Boylestad, R. L. (2016). "**Análisis de circuitos: Teoría y aplicaciones**." Editorial Pearson Education.

Kendall y Kendall (2011) "**Análisis y Diseño de Sistemas**". 8va Edición. Camden, New Jersey, editorial Pearson.

Ogata, K. (2015). "**Ingeniería de control moderna**". 5ta Edición. Madrid, España. Editorial Pearson.

Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2020). "Ingeniería del software" 9na edición. McGraw-Hill Education.

Sommerville, I. (2016). "**Ingeniería del software**" 10ma Edición. Pearson Educación.