

Diseño mecatrónico de una máquina para medición de fuerza en la rehabilitación monitorizada

Luz María Tobar

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador
lmtobarsubia@utn.edu.ec

Daniel Álvarez

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador
daalvarez@utn.edu.ec

Gabriela Verdezoto

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador
gaverdezoto@utn.edu.ec

Iván Iglesias

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador
iiglesias@utn.edu.ec

Christian Renán Vásquez

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador
crvasquez@utn.edu.ec

Fecha de Recepción. 6 de Junio de 2020 - Fecha de Aceptación. 30 de Octubre de 2020

Resumen: Las pruebas utilizadas en el campo de la fisioterapia para la evaluación de la fuerza muscular como Lovett, Daniels, entre otras, son netamente cualitativas y se basan directamente en la experiencia del especialista. La evaluación de un rango de medición angular y fuerza en movimientos de flexión y extensión permitirá diseñar un mecanismo de rehabilitación monitorizada. Con este antecedente, el objetivo de la investigación es el análisis y diseño mecatrónico de una máquina de medición de la fuerza para la rehabilitación monitorizada, enfocado a los movimientos de flexión y extensión. Se utiliza el diseño de la estructura básica de un sistema mecatrónico y sistemas ciber-físicos para garantizar el control y tratamiento de fortalecimiento muscular de forma segura y eficiente evitando lesiones al paciente. Al final del documento se presenta la estructura mecatrónica del mecanismo el cual incluye tres módulos: isocinético, pasivo y análisis de la información. Se concluye con la definición de las características principales que permiten una mejor integración del sistema y un alto aprovechamiento del conocimiento.



Palabras Clave: ángulo, dinamómetro, diseño, fuerza, isocinético, músculo.

Abstract: Tests used in the field of physiotherapy for the evaluation of muscular strength as Lovett, Daniels, among others, are purely qualitative and are based directly on the experience of the specialist. The evaluation of a range of angular measurement and force in flexion and extension movements will allow the design of a monitored rehabilitation machine. With this background, the objective of the research is the analysis and functional design of a force measurement machine for monitored rehabilitation, focused on flexion and extension movements. The design of the basic structure of a mechatronic and cyber-physics system is used to guarantee the control and treatment of muscular strengthening in a safe and efficient way of avoiding injuries to the patient. At the end of the document, the functional structure of the mechanism is presented, which includes three modules: isokinetic, passive and information analysis. It concludes with the definition of the main characteristics that allow a better integration of the system and a high use of knowledge.

KeyWords: angle, dynamometer, design, force, isokinetic, muscle.

1 | Introducción

Los avances y desarrollos de la tecnología en las máquinas de rehabilitación han provocado la creación de sistemas mecatrónicos más sofisticados en el área médica [1]. Los instrumentos para evaluar grupos musculares en el miembro inferior como los agonistas y antagonistas en diferentes grados de movimiento determinan la capacidad del amputado para caminar [2].

Investigaciones con el dinamómetro isocinético sirven para la valoración de músculos de la mano [3]. La misma metodología se utiliza para prevenir lesiones en deportistas y predecir futuras lesiones, ver [4]. Existen pocos dispositivos o adaptadores que trabajan en resistencia y movimiento basados en la contracción concéntrica que no requieren movimiento del paciente [5].

En el Ecuador se ha trabajado con entrenadores para la rehabilitación que evalúan la biomecánica muscular desde el punto de vista electromiográfico, [6].

En la era de la digitalización los sistemas anteriormente mencionados, no cuentan con comunicación a la nube ni la posibilidad de trabajar con productos cada vez más complejos [7]. Todavía hay problemas difíciles de resolver para hacer que esas tecnologías sean aplicables [8].

En un futuro los equipos de rehabilitación serán sistemas conectados a la red para brindar atención continua de alta calidad [2]. Provocando la necesidad de diseñar sistemas ciber-físicos médicos (MCPS por sus siglas en inglés) cada vez más complejos que sean seguros y fiables [8].

Se propone realizar el diseño mecatrónico de una máquina de fuerza para la rehabilitación monitorizada y así crear perfiles de cada paciente con el ángulo del movimiento y la fuerza ejercida. El trabajo se enfocará a personas que presentan amputación de miembro inferior bajo la rodilla.

La estructura del artículo es la siguiente. la sección dos (II) compara diferentes métodos manuales para la evaluación muscular y presenta los sistemas ciber-físicos médicos; la sección tres (III) manifiesta la metodología del diseño, la sección cuatro (IV) expone la estructura mecatrónica como resultado y finalmente en la última sección (V) las conclusiones y trabajo a futuro.

Nom bre	Lovett	Daniels	Oxford	Escala de Cyriax (Isométrica)			
Grad o	DESCRIPCIÓN			Interpret ación	Sigl a	Significad o	Descripción
0 Cero	Ausencia de Contracción	Ninguna respuesta muscular	Ausencia de Movimiento y Contracción	Parálisis Total	FSD	Fuerte sin dolor	Normal
1 Rastr eo	Contracción visible o palpable	Músculo realiza contracción visible / palpable SIN movimiento	Débil contracción en zona tendinosa, Sin Movimiento	Parálisis Parcial	FD	Fuerte con dolor	Presencia de lesión menor
2 Pobre	Movimiento activo en todo el ROM sin gravedad	Músculo realiza TODO el movimiento Sin Gravedad / Sin Resistencia	Movimiento en todo el ROM sin Gravedad	Déficit de Movimie nto Voluntari o	DSD	Débil sin dolor	Rotura completa de músculo / Tendón Trastorno de SN
3 Regul ar	Movimiento activo en todo el ROM contra gravedad	Músculo realiza TODO el movimiento Contra Gravedad / Sin Resistencia	Movimiento en todo el ROM con Gravedad		DD	Débil con dolor	Lesión importante (Fx)
4 Buen o	Movimiento activo completo contra gravedad + resistencia	Movimiento en toda amplitud CONTRA Gravedad + Resistencia Moderada	Movimiento en todo el ROM con Gravedad + Resistencia Mod		DT M	Dolor en todos los movimient os	Hipersensibili dad emocional
5 Norm al	Movimiento activo completo contra gravedad + resistencia máxima	Músculo soporta resistencia normal manual máxima, Movimiento Completo, contra gravedad.	Movimiento en todo el ROM con Gravedad + Resistencia Máxima	Músculo normal	DR M	Dolor al repetir movimient os	Claudicación Intermittente

Tabla 1 Comparación de métodos para la evaluación de la fuerza muscular, [9] [10]

2 | Estado del arte

En esta sección se proporciona una breve introducción de las pruebas comunes que se utilizan en la evaluación de la fuerza muscular, la dinamometría aplicada a amputados, se expone los sistemas ciber-físicos médicos y finalmente el modelado de sistemas híbridos.

2.1 | Evaluación de la fuerza muscular

La rehabilitación es devolver al paciente un nivel de función aceptable. Por lo cual, debe ser entrenado y alentado en ejercicios de fortalecimiento. No debe utilizarse como única forma de entrenar la fuerza, siempre deben ir acompañados de ejercicios concéntricos dinámicos con cargas ligeras que ayudan a mejorar su nivel muscular [11].

Existen muchos métodos de prueba y clasificación de la fuerza muscular más utilizados por los fisioterapeutas. Lovett [12] propone un procedimiento para evaluar la actividad muscular en forma de puntuación numérica, igual que Oxford. Este registro oscila entre (0), que representa la ausencia de actividad, y cinco (5), que representa una respuesta normal a la prueba, [9]. Otros como Daniels usan palabras (Normal, Bueno, Regular, Pobre, Rastreo o Cero) o letras (N, G, F, P, T, O) para simbolizar sus categorías básicas de calificación. Y le han agregado puntuaciones adicionales, un signo más (+) o menos (-) al grado básico para denotar una mayor o menor cantidad de resistencia o rango a través del movimiento, [10].

En la tabla 1 se compara diferentes métodos, los cuales son cualitativos; muchas veces esta estimación la realiza el especialista (fisioterapeuta), la cual dependerá de su experiencia.

Es importante resaltar que los músculos cuando realizan un movimiento trabajan tridimensionalmente por la activación de cadenas cinéticas musculares. Por eso ningún músculo trabaja en una sola función.

2.2 | La Dinamometría

En la evaluación de la fuerza muscular se utiliza la dinamometría que es una herramienta útil [13] y [14]. Se emplea el dinamómetro para medir la fuerza isocinética, concéntrica y excéntrica, así como la fuerza isométrica de los músculos del cuerpo [15].

Existen estudios que utilizan el dinamómetro para evaluar el rendimiento físico en amputados. Así, en [16], exponen como la fuerza muscular del muslo de la extremidad amputada disminuye paulatinamente durante los primeros años después de la amputación, razón por la cual la rehabilitación es importante. La calidad del desempeño en posición de pie y de marcha depende de la fuerza de estos músculos, que activan la rodilla de la extremidad amputada.

Sin embargo, los músculos del miembro inferior ejercen más fuerza, por ejemplo, los músculos cuádriceps e isquiotibiales de la extremidad en amputados por debajo de la rodilla, [17]. En [18], consideraron los parámetros de torque pico y

torque promedio máximo de los cuádriceps y los músculos isquiotibiales. En la misma línea se observaron disminuciones significativas en la fuerza de los cuádriceps y los isquiotibiales de la extremidad amputada [16].

2.3 | Sistemas Ciber-físicos Médicos (MCPS)

Debido a la creciente complejidad de sistemas médicos específicamente en dispositivos de monitorización para la rehabilitación y la aparición del internet de las cosas. Además, del aumento en el uso y desarrollo de dispositivos médicos conectados y distribuidos que debe transferir a las capas más altas como las de comunicación y aplicación [19]. Se han desarrollado nuevos métodos que utilizan los sistemas ciber-físicos en el área médica para su funcionamiento [20].

Estos sistemas combinan dispositivos digitales -analógicos, interfaces, redes, sistemas informáticos y similares con el mundo físico natural. Llegando a emplear información del mundo físico como del informático para obtener los modelos híbridos [7].

Los sistemas ciber-físicos médicos, ofrecen nuevas funcionalidades, uso de la conectividad con la red y la demanda de un monitoreo continuo del paciente, presentan nuevos desafíos en el proceso de desarrollo de MCPS y, al mismo tiempo, crean nuevas oportunidades para la investigación y el desarrollo [21] y [22].

En la Fig. 1, se ilustra las capas de representación de los sistemas que involucra el internet de las cosas médicas (IoT para sus siglas en inglés) [7].

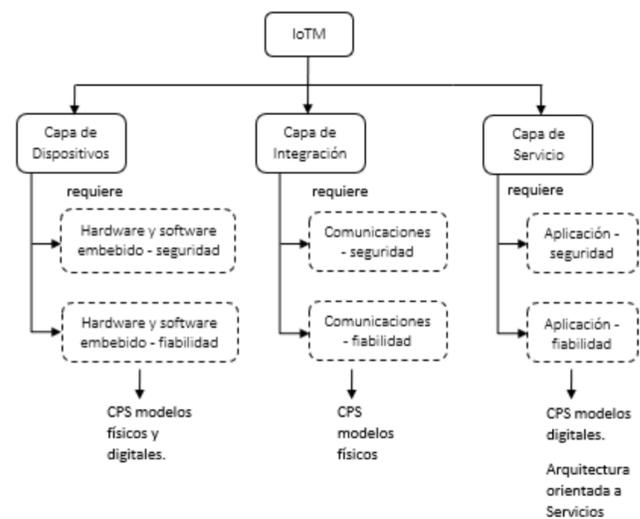


Fig. 1 Representación de las capas IoTM [7].

El enfoque principal del internet de las cosas en el área de salud es la interconexión no solo entre numerosos equipos médicos personales sino también entre dispositivos y proveedores de atención médica.

La conexión con la nube presenta requisitos adicionales como el procesamiento de la información, seguridad de los datos recopilados, políticas de acceso a los datos y protocolos de comunicación.

En la Fig. 2, se introduce un ejemplo de la nueva estructura de un dispositivo con interfaz de entorno físico basados en los sistemas ciber-físicos médicos [23]. Configurando el monitoreo, las limitaciones del sistema, la interferencia ambiental y las interacciones no físicas [24].

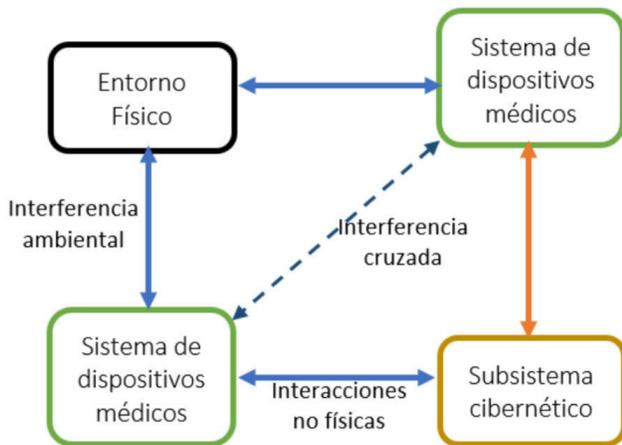


Fig. 2 Estructura del sistemas MCPS [23]

2.4 | Sistemas Híbridos

Es importante entender el comportamiento de los sistemas ciber-físicos como un combinado de sistemas discretos – continuos, es decir, los procesos físicos con cambios de estado discretos inherentes [25] para el control de los sistemas híbridos.

El análisis de los sistemas discretos del sistema a controlar vienen dados por la planta no lineal de tiempo continuo que se representa en la ecuación 1, [26].

$$z=f(z,u) \quad (1)$$

Donde z es el estado y u la entrada. Por ende, z y u están obligados a pertenecer al conjunto X y U respectivamente.

Una discretización de este modelo por un tiempo de muestra ΔT es dada por $z^{+}=f(z^{\wedge},u^{\wedge})$, donde z^{\wedge} , u^{\wedge} y f^{\wedge} son las discretizaciones de z , u y f respectivamente y z^{+} denota el valor del estado después de un step discreto.

Sea k el tiempo discreto. dado el estado z^{\wedge} en el tiempo k , denota como z^{\wedge}_k el algoritmo de control predictivo por modelado (MPC por sus siglas en inglés), calcula la evolución del estado del sistema de tiempo discreto en (2) para que N avance en el tiempo de acuerdo con las secuencias de entrada de forma.

$$U^{\wedge}_k=\{u^{\wedge}_{k,k},u^{\wedge}_{k,k+1},\dots,u^{\wedge}_{k,k+N-1}\} \quad (2)$$

donde $u^{\wedge}_{k,k+s}$ denota el valor de los pasos discretos de la entrada después del estado inicial z^{\wedge}_k . Así, el objetivo es resolver el problema [26].

$$P(z^{\wedge}_k), \operatorname{argmin} J_N(z^{\wedge}_k, U^{\wedge}_k) \quad (3)$$

En el caso de IoT puede extenderse fácilmente con modelos digitales de red para integrar dispositivos, [22], como se visualiza en la Fig. 3.

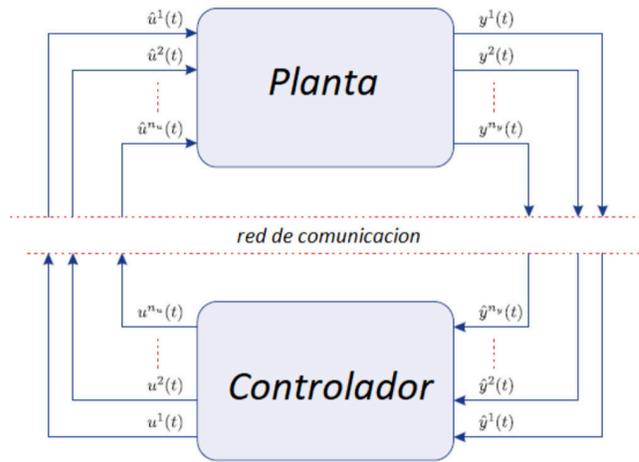


Fig. 3 Sistema de Control en red [27]

Donde la planta que representa el modelo físico se comunica con el controlador (algoritmos de control) por medio de la red de comunicación. Un ejemplo del control digital de un sistema no lineal de tiempo continuo con dispositivos de muestreo y retención [28] se ilustra en la Fig. 4.

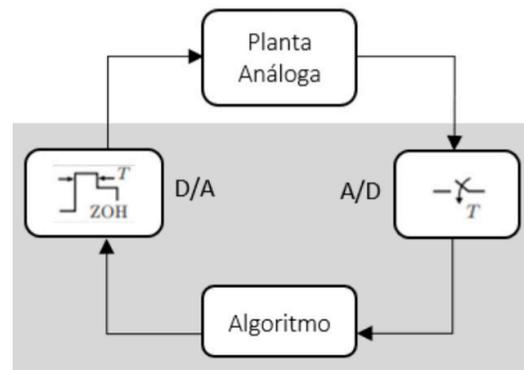


Fig. 4 Control digital de un sistema no lineal de tiempo continuo [28]

Como ejemplo, considere el sistema de control en red (NCS por sus siglas en inglés) de la Fig. 4 en el que se representa una planta física controlada por un controlador de retroalimentación a través de una red de comunicación compartida [27].

Se presenta el sistema de circuito cerrado con controlador de reinicio, la planta más la condición de reinicio, donde la señal de entrada es la referencia, ver Fig. 5.

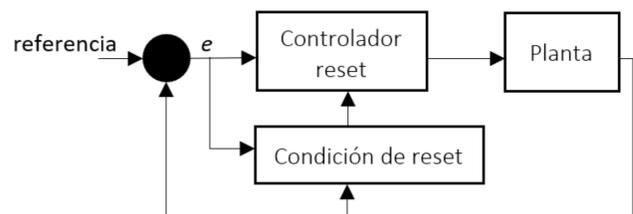


Fig. 5 Sistema de circuito cerrado con controlador de reinicio [28]

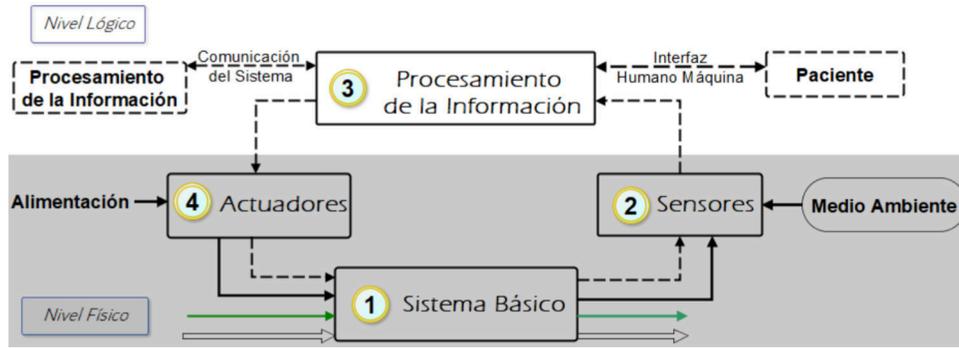


Fig. 6 Estructura básica de un sistema mecatrónico, [30]

En la siguiente sección se evidencia la metodología del diseño mecatrónico de la máquina.

3 | Metodología

Basados en la metodología mecatrónica y la norma VDI 2206, [7], se realiza el análisis funcional de la máquina para medición de la fuerza. Como base se utiliza el sistema básico que se muestra en la Fig. 6, [29]. En la gráfica, el bloque en forma de flecha representa el flujo de materia, las líneas continuas de color negro y verde representan el flujo de energía y la línea negra entre cortada el flujo de información. Los cuadros con líneas entrecortadas simbolizan elementos opcionales. Los demás son elementos necesarios.

En relación con la estructura básica se visualiza la separación de los dos niveles. lógico y físico. Para el diseño se definen las especificaciones del dispositivo. El cuál contará con los siguientes requerimientos.

- Estimación en el nivel de fuerza,
- Medición del ángulo (rango de movimiento)
- Funcionamiento a velocidad constante
- Análisis de la información general

A continuación, se detalla la arquitectura funcional de la máquina. El *sistema básico* (1). Será la estructura física es decir la base mecánica con capacidad de ajuste en la traslación que facilite la alineación del dinamómetro con la extremidad parcial del sujeto sin requerir el movimiento de este. El sensor (2) maneja el dinamómetro para la medición del nivel de fuerza. En el caso del rango angular el goniómetro. En el procesamiento de la información (3) se utilizará la tarjeta MYRIO de National Instruments, por su capacidad de funcionamiento en tiempo real [9]. El mismo que se vincula con el HMI para la visualización de las curvas de fuerza de movimiento y relación de los diferentes valores obtenidos (retroalimentación). Como actuador (4), para lograr el movimiento y garantizar la velocidad constante se emplea un servomotor, [31].

En la Fig. 7, se representa la caja negra que relaciona los flujos de entrada y los de salida. Sin embargo, esta representación es muy esquemática; por eso se divide en varios módulos, lo que permite tener una representación más precisa de cada función, [32].

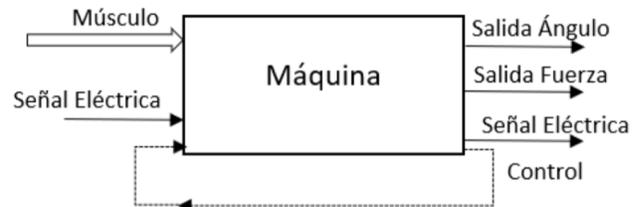


Fig. 7 Caja negra del Sistema.

Al realizar el análisis desde el punto de vista del diseño concurrente, [33], se consideran. (1) Módulo isocinético, (2) módulo isométrico e (3) interfaz de la información.

3.1 | Módulo isocinético

Su acción principal es ejercitar con resistencia variable a velocidad constante. Es importante para el manejo de cargas y su incidencia en los trastornos músculo esqueléticos, es decir, previene lesiones futuras, mejora los tratamientos de fortalecimiento muscular de forma segura y eficiente. Comprende los siguientes elementos medidor de fuerza y angulación, ver Fig. 8.

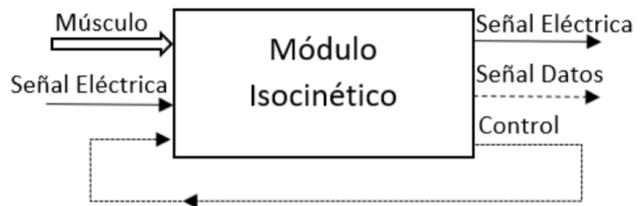


Fig. 8 Caja negra módulo isocinético

3.2 | Módulo Isométrico

Se le ha definido como módulo pasivo también. Para este caso el movimiento será nulo, solo activación voluntaria se trabajará. Se medirá el rango angular en movimientos de flexión y extensión, ver Fig. 9.

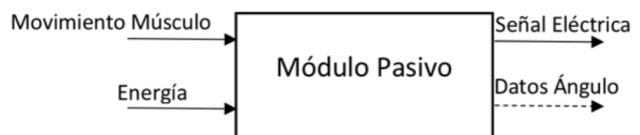


Fig. 9 Caja negra módulo isométrico.

3.3 | Análisis de la información

Sirve para evaluar y comparar las respuestas musculares obtenidas, Fig. 10. Genera un informe donde se aclara el efecto de entrenamientos en la mejora del desempeño funcional y se muestra la valoración estadística en forma de gráficos de los resultados obtenidos.

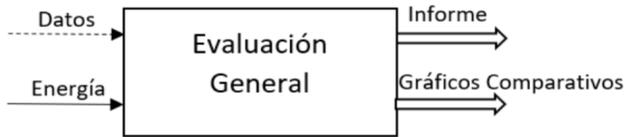


Fig. 10 Caja negra análisis de la información.

El protocolo en el análisis de datos de las pruebas isocinéticas, se menciona en [34]. A continuación, en la siguiente sección se presenta el análisis del sistema de control.

3.4 | Modelamiento de sistemas híbridos

Los sistemas dinámicos híbridos representan el proceso fisiológico y el control numérico. Lo que faculta la detección rápida y corrección precisa de comportamientos inesperados.

Los modelos híbridos deben representar con precisión ambos mundos para lograr un proceso de diseño eficiente [35]. Para el análisis de accesibilidad a los sistemas híbridos, se señalan algunas de sus características individuales con respecto a varias propiedades que son cruciales para la verificación de las mismas; tal cual se ilustra en la Fig. 11.

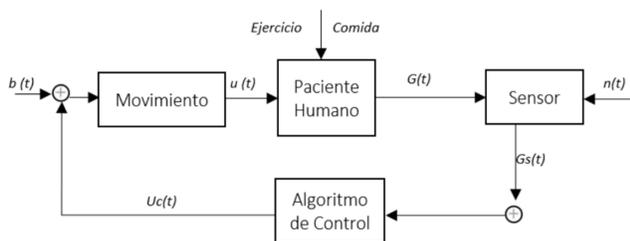


Fig. 11 Sistema de control de la máquina de medición de la fuerza.

donde. $u(t)$. representa la señal de entrada, $G(t)$. la señal de entrada del movimiento, $n(t)$. el error de medición del sensor (ruido), $G_s(t)$. nivel del ángulo y fuerza.

En contraste con el monitoreo tradicional, el sistema híbrido de control empuja a que las actividades se verifiquen en tiempo real localmente hacia la ubicación. En la Fig. 12, se presenta el modelo del sistema de circuito cerrado que combina controladores locales y globales para el diseño del sistema [28].

En una configuración de monitoreo las mediciones se producen de manera independiente en la ubicación de los procesos y pueden ser procesadas por diferentes monitores de forma independiente. Se desarrollaron varias herramientas y algoritmos para los modelos de máquina de estado híbrido derivados de la red de Petri y así, verificar los modelos IoMT, ver Fig. 13.

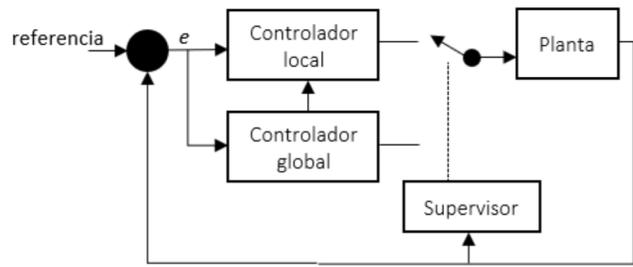


Fig. 12 Estructura Funcional de la Máquina.

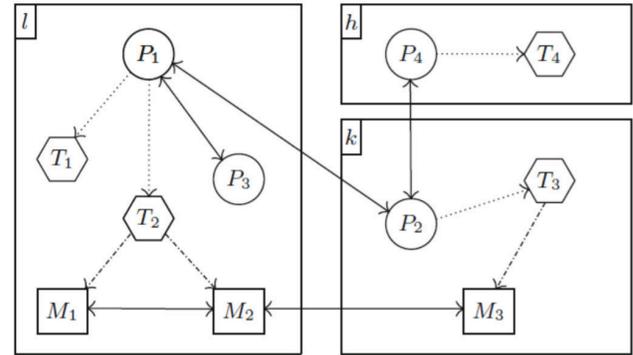


Fig. 13 Máquina de estado híbrido derivados de la red de Petri.

Por ende, el modelo basado en CPS busca lograr una mejor confiabilidad,[22]. A través, del modelado de la pérdida de paquetes en una arquitectura en red dedicada [22]

4 | Resultados

La metodología implementada proyecta la estructura mecatrónica (Fig. 14). La cual muestra como el control está presente en los sistemas integrados.

Además, se puede ver el nuevo sistema funcional, con criterios de sistemas cibertrónicos. Lo que permitirá informar la necesidad de componentes, tener al alcance datos de la máquina, hasta información exacta de los proveedores; también información relevante sobre el proceso en tiempo real. Se ha tomado en cuenta la configuración de la resistencia en forma discriminada con relación de la fuerza que cada paciente es capaz de realizar.

La Fig. 14, muestra el esquema del diseño general de la estructura cibertrónica de la máquina como principal guía de referencia para identificar subsistemas y componentes claves que se interconectan para diseñar, desarrollar e integrar.

Los roles de asignación desempeñan un papel crucial en un diseño exitoso y, finalmente, para promover la aceptabilidad de la tecnología del IoMT propuesta.

Siendo un punto de partida para futuras investigaciones el desempeño muscular y capacidad funcional en pacientes amputados y no amputados con criterios de MCPS.

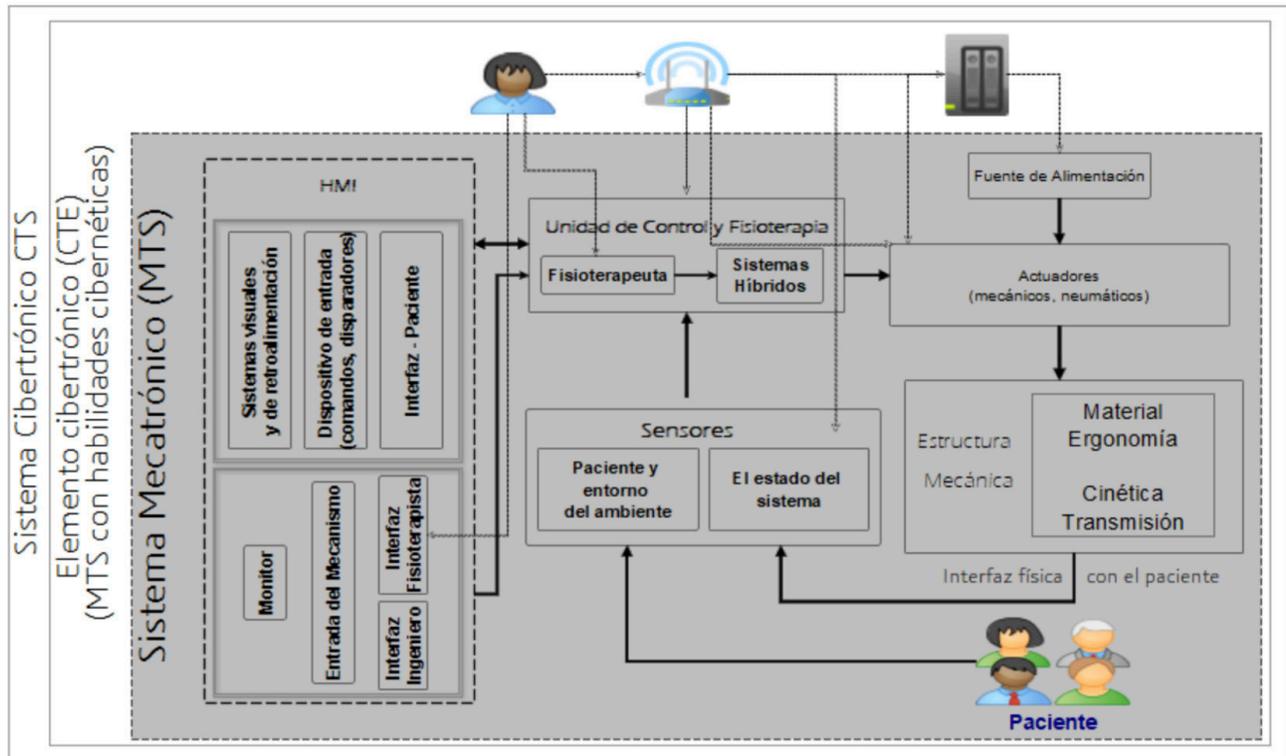


Fig. 14 Estructura Funcional de la Máquina.

Una desventaja que se tuvo son los procesos biológicos porque son difíciles de modelar debido a su aparente aleatoriedad y sus propiedades fisiológicas inherentes, que se basan en la física, la bioquímica y una amplia variedad de otros campos.

5 | Conclusiones

El diseño cibertrónico obtenido presenta un modelo completo del sistema, el cual vincula diferentes áreas y aprovecha mejor de manera continua el conocimiento para la conexión de la maquinaria a la nube.

El análisis comparativo de gráficos permitirá al especialista evidenciar los avances del tratamiento, mejorar la habilidad motora y mantener un registro para futuros pacientes.

El realizar un diseño antes de la construcción del primer prototipo, fortalece la evaluación y validación en cada etapa del proyecto para tener una retroalimentación continua.

5.1 | Trabajo a Futuro

En la creación de nuevos dispositivos cibertrónicos médicos será posible si dentro del proceso de desarrollo se integra el internet de las cosas para satisfacer los requisitos de seguridad y confiabilidad más el análisis de los sistemas dinámica híbridos.

Referencias

- [1] D. Simonetti, N. L. Tagliamonte, L. Zollo, D. Accoto, and E. Guglielmelli, "Biomechatronic design criteria of systems for robot-mediated rehabilitation therapy," in *Rehabilitation Robotics*. Elsevier, 2018, pp. 29-46.
- [2] R. S. Gailey et al., "The amputee mobility predictor. an instrument to assess determinants of the lower-limb amputee's ability to ambulate," *Arch Phys Med Rehabil*, vol. 83, no. 5, pp. 613-27, May 2002.
- [3] B.-s. Choi, "A Comparative Study of Optimal Stretch Intensity For Flexibility of Hamstrings; Hand Held Dynamometer and Verbal Rating Scale," *Physical Therapy Korea*, vol. 24, no. 4, pp. 38-45, 2017.
- [4] K. Bennell et al., "Isokinetic strength testing does not predict hamstring injury in Australian Rules footballers," *British journal of sports medicine*, vol. 32, no. 4, pp. 309-314, 1998.
- [5] U. Kuruganti and V. Chester, "Adapters for use with dynamometer for subjects having limb impairment," ed. Google Patents, 2018.

- [6] G. V. Luz María Tobar subía, Jorge Cuasapaz, "Memorias del I Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación," *CIBSIR* 2017, vol. 1, 2017.
- [7] M. Cadet and H. Meissner, "Cybertronische Systeme," in *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme*. Springer, 2017, pp. 19-22.
- [8] I. Lee et al., "Challenges and research directions in medical cyber-physical systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 1, pp. 75-90, 2012.
- [9] H. Hislop, D. Avers, and M. Brown, Daniels and Worthingham's *muscle Testing-E-Book. Techniques of manual examination and performance testing*. Elsevier Health Sciences, 2013.
- [10] R. W. Bohannon and M. B. Smith, "Interrater reliability of a modified Ashworth scale of muscle spasticity," *Physical therapy*, vol. 67, no. 2, pp. 206-207, 1987.
- [11] P. S. Lum, C. G. Burgar, P. C. Shor, M. Majumdar, and M. Van der Loos, "Robot-assisted movement training compared with conventional therapy techniques for the rehabilitation of upper-limb motor function after stroke," *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 83, no. 7, pp. 952-959, 2002.
- [12] S. Bandinelli et al., "Measuring muscular strength of the lower limbs by hand-held dynamometer. a standard protocol," *Aging Clinical and Experimental Research*, vol. 11, no. 5, pp. 287-293, 1999.
- [13] M. Camargo, C. E. P. T. Fregonesi, A. J. L. Nozabieli, and C. R. S. de Faria, "AVALIAÇÃO DA FORÇA MUSCULAR ISOMÉTRICA DO TORNOZELO. DINAMOMETRIA. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA AVALIAÇÃO DA FORÇA MUSCULAR ISOMÉTRICA DO TORNOZELO. DINAMOMETRIA. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA," *Revista Brasileira de Ciências da Saúde*, vol. 13, no. 2, pp. 89-96, 2010.
- [14] I. M. González-Moro, "GENERALIDADES SOBRE LA DINAMOMETRÍA ISOCINÉTICA," *Academia*.
- [15] V. Moreno-Pérez, D. Barbado-Murillo, C. Juan-Recio, C. M. Quesada-de-la-Gala, and F. J. Vera-García, "Aplicación de la dinamometría isocinética para establecer perfiles de riesgo de lesión isquiosural en futbolistas profesionales.[The use of isokinetic dynamometry to establish risk profiles of hamstring injury in professional football players]," *RICYDE. Revista Internacional de Ciencias del Deporte*. doi. 10.5232/ricyde, vol. 9, no. 34, pp. 333-341, 2013.
- [16] E. Isakov, H. Burger, M. Gregoric, and C. Marincek, "Isokinetic and isometric strength of the thigh muscles in below-knee amputees," *Clinical Biomechanics*, vol. 11, no. 4, pp. 233-235, 1996.
- [17] J.-L. Croisier, B. Forthomme, M.-H. Namurois, M. Vanderthommen, and J.-M. Crielaard, "Hamstring muscle strain recurrence and strength performance disorders," *The American journal of sports medicine*, vol. 30, no. 2, pp. 199-203, 2002.
- [18] N. van Dyk et al., "Hamstring and quadriceps isokinetic strength deficits are weak risk factors for hamstring strain injuries. a 4-year cohort study," *The American journal of sports medicine*, vol. 44, no. 7, pp. 1789-1795, 2016.
- [19] I. Lee and O. Sokolsky, "Medical cyber physical systems," pp. 743-748. IEEE.
- [20] M. Eigner, W. Koch, and C. Muggeo, "Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme," in *Der PLM-unterstützte Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme*. Springer, 2017.
- [21] M. Woodside, J. E. Neilson, D. C. Petriu, and S. Majumdar, "The stochastic rendezvous network model for performance of synchronous client-server-like distributed software," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 44, no. 1, pp. 20-34, 1995.
- [22] A. Gatouillat, Y. Badr, B. Massot, and E. Sejdić, "Internet of medical things. A review of recent contributions dealing with cyber-physical systems in medicine," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 3810-3822, 2018.
- [23] P. Rizwan, M. R. Babu, B. Balamurugan, and K. Suresh, "Real-time big data computing for Internet of Things and cyber physical system aided medical devices for better healthcare," in *2018 Majan International Conference (MIC)*, 2018, pp. 1-8.
- [24] E. Bartocci and Y. Falcone, Lectures on Runtime Verification. *Introductory and Advanced Topics*. Springer, 2018.
- [25] S. Schupp et al., "Current challenges in the verification of hybrid systems," pp. 8-24. Springer.
- [26] K. Zhang, J. Sprinkle, and R. G. Sanfelice, "Computationally aware switching criteria for hybrid model predictive control of cyber-physical systems," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 479-490, 2016.
- [27] M. R. Mousavi and C. Berger, *Cyber Physical Systems. Design, Modeling, and Evaluation. 5th International Workshop, CyPhy 2015, Amsterdam, the Netherlands, October 8, 2015, Proceedings*. Springer, 2015.
- [28] R. Goebel, R. G. Sanfelice, and A. R. Teel, "Hybrid dynamical systems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 29, no. 2, pp. 28-93, 2009.

[29] A. H. G. J. Feldhusen, Dresden; J.-P. Majschak, Dresden; M. Orloff, Berlin; H. Schürmann, Darmstadt, "Grundlagen der Konstruktionstechnik," (in Deutsch), *Grundlagen der Konstruktionstechnik - 1 Grundlagen technischer Systeme und des methodischen Vorgehens*, 2002.

[30] D. Casner, R. Houssin, J. Renaud, and D. Knittel, "An Optimization-Based Embodiment Design Approach for Mechatronic Product Development," *The Open Automation and Control Systems Journal*, vol. 9, no. 1, 2017.

[31] J. Chipka, M. A. Meller, A. Volkov, M. Bryant, and E. García, "Linear dynamometer testing of hydraulic artificial muscles with variable recruitment," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 28, no. 15, pp. 2051-2063, 2017.

[32] C. R. i. Romeva, "Diseño concurrente," 2002.

[33] A. Bryan, H. Wang, and J. Abell, "Concurrent Design of Product Families and Reconfigurable Assembly Systems," *Journal of Mechanical Design*, vol. 135, no. 5, pp. 051001-051001-16, 2013.

[34] B. G. Roces, "Análisis de datos para el estudio de pruebas isocinéticas de tobillo," 2017.

[35] J. Eker et al., "Taming heterogeneity-the Ptolemy approach," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 1, pp. 127-144, 2003