



Soluciones de mantenimiento para exoesqueleto de miembro superior en el tratamiento fisioterapéutico del hombro

Maintenance solutions for upper limb exoskeleton in shoulder physiotherapy treatment

Segismundo Mojícar-Caballero^I, Jorge Bonzon-Regalado^I, Daily Milanés-Hermosilla^{II}, Mauricio Torres-Quezada^I, Ruthber Rodríguez-Serrezuela^{III}, Roberto Sagaró-Zamora^I. *

I. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Mecánica. Santiago de Cuba, Cuba.

II. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Eléctrica. Santiago de Cuba, Cuba.

III. Corporación Universitaria del Huila-CORHUILA, Facultad de Ingeniería. Neiva, Colombia.

* Autor de correspondencia: sagaro@uo.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](#)



Recibido: 1 de julio de 2024

Aceptado: 2 de agosto de 2024

Resumen

En este trabajo se hizo un estudio para el establecimiento de tareas de mantenimiento en equipos de reciente diseño y manufactura. Se tomó como objeto de investigación un exoesqueleto de miembro superior diseñado y construido en Cuba para el tratamiento fisioterapéutico del hombro doloroso del paciente hemipléjico y la capsulitis adhesiva. Como equipo recién construido en el país y la escasa base de datos de fiabilidad y el mantenimiento de tales equipos, se utilizó un enfoque de Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad para la definición de las tareas profilácticas de mantenimiento, se determinaron las funciones principales y accesorias del mismo, así como las principales fallas

potenciales y sus posibles soluciones. Se logró establecer un conjunto de acciones preventivas a cada una de estas fallas asegurando la disponibilidad técnica durante el período de evaluación en un entorno exigente, en condiciones reales de explotación sin interrupciones como lo es la rehabilitación fisioterapéutica. Estas tareas de mantenimiento podrían generalizarse en otras plataformas robóticas que trabajan bajo los mismos principios en salas de rehabilitación.

Palabras claves: Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad, análisis de fallas, exoesqueleto.

Abstract

In this work, it is made a study for the definition of maintenance tasks in recently designed and manufactured equipment. It is focused in an upper limb exoskeleton designed and built in Cuba for the physiotherapeutic treatment of painful shoulder in hemiplegic patients and adhesive capsulitis. Being the only equipment of its kind in the country and the scarce literature on the maintenance of such equipment, a Reliability Centered Maintenance approach is used for the definition of prophylactic maintenance tasks, also the main and accessory functions were determined, as well as the main potential failures and

their solutions. It was possible to establish a set of preventive actions for each of these failures, ensuring technical availability during the evaluation period in a demanding environment, in real operating conditions without interruptions, such as physiotherapeutic rehabilitation. These maintenance tasks can be generalized to other robotic platforms that work under the same principles in rehabilitation rooms.

Key words: Reliability Centered Maintenance, failure analysis, exoskeleton.

Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

Mojícar Caballero S, Bonzon Regalado J, Milanés Hermosilla D, Torres Quezada M, Rodríguez Serrezuela R, Sagaró Zamora R. Soluciones de mantenimiento para un exoesqueleto utilizado en el tratamiento fisioterapéutico. Ingeniería Mecánica. 2024;27(3):e700.

1. Introducción

Los sistemas robóticos destinados a la rehabilitación fisioterapéutica de diferentes dolencias es un tema que recientemente ha despertado gran interés [1-3]. Al igual que su fiabilidad en entornos clínicos, debido a la necesidad de realizar evaluaciones a corto y largo plazo del funcionamiento de estos equipos para consolidar las ventajas de su empleo en estos tratamientos y evitar las graves consecuencias del posible fallo o malfuncionamiento de los mismos en un entorno clínico [4-6].

El presente trabajo trata sobre la investigación de fallos potenciales para la asignación de tareas de mantenimiento a un exoesqueleto de miembro superior utilizado en la rehabilitación fisioterapéutica, diseñado y construido en Cuba [7-8].

La problemática surgida al abordar la tarea de establecer tareas de mantenimiento para este exoesqueleto es precisamente que, por no existir un precedente de su uso en Cuba, no se cuenta con un historial técnico de fallos por lo que resulta imposible hacer un pronóstico estadístico de la formación, evolución y manifestación de los modos de fallo. Ante esta carencia de información la alternativa viable es estudiar los modos de fallos potenciales(9). Para ello, se apeló a un conjunto de herramientas analíticas a partir de las cuales se podrá establecer un orden de prioridad para el desarrollo de medidas profilácticas preventivas que brinden soluciones a la posible ocurrencia de fallos y permitan retroalimentar el diseño de futuras arquitecturas [10-13].

Después de valorar las posibles alternativas para el desarrollo de la investigación, se decidió utilizar el método del Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad (MCF), dada la posibilidad de ajustarse tanto a sistemas con cierta madurez en la explotación como a sistemas recién diseñados [14-16].

El MCF es una metodología que se ha implementado en el sector industrial desde hace varias décadas con innumerables reportes de éxitos [4, 6, 13]. Su principal desventaja radica en el alto costo en términos de tiempo de implementación, lo que ha conllevado a diferentes modificaciones de su modelo conceptual [17]. En este caso, donde no se tiene la complejidad de un ambiente industrial y se trata de un único equipo, las desventajas citadas no tienen ningún impacto.

La carencia de información estadística apunta a la necesidad de emplear técnicas analíticas que se sustenten principalmente en la experticia de los diseñadores quienes declaran los modos de fallos potenciales que pueden presentarse en el equipo recién construido. Esto redundará a favor del empleo de la metodología del MCF en esta investigación.

El objetivo de este trabajo fue determinar las tareas básicas de mantenimiento para un exoesqueleto utilizado en el tratamiento de rehabilitación del hombro hemipléjico, haciendo uso del modelo conceptual del mantenimiento centrado en la fiabilidad de manera que se logre la continuidad de su servicio con un nivel de disponibilidad aceptable.

2. Métodos y Materiales

Este exoesqueleto destinado a la rehabilitación fisioterapéutica del miembro superior, va a estar sometido a regímenes de trabajo que, durante el tiempo de uso, van a propiciar la presencia de mecanismos de fallos (desgaste, corrosión, etc.)

El exoesqueleto se encuentra en una etapa inicial de explotación durante la cual se están realizando ajustes y corrigiendo los defectos heredados de la manufactura. Es ideal implementar un enfoque MCF durante el diseño y desarrollo de un nuevo producto no solo para la definición del mantenimiento en operación sino por la posibilidad que ofrece de retroalimentar el diseño. La efectividad de cambios de diseño es mayor cuando se realiza durante la fase de diseño y desarrollo que una vez puesto en operación el equipo [14].

Metodología de análisis del MCF

Partiendo del concepto de la fiabilidad de un objeto, el modelo del MCF lleva en esencia la preservación de las funciones externas e internas para la que cada sistema o subsistema fue diseñado [13, 17].

El MCF del exoesqueleto integra un conjunto de procedimientos, los cuales sirven de base para introducir el denominado árbol lógico del MCF. Estos procedimientos son:

Paso 1. Selección del sistema y recopilación de la información.	Análisis estructural y funcional
Paso 2. Definición de las fronteras del sistema y subsistemas.	
Paso 3. Descripción del sistema y análisis de funciones.	
Paso 4. Funciones del sistema y fallos funcionales.	
Paso 5. Análisis de los modos de fallos y sus efectos (FMECA)	Análisis de los fallos funcionales
Paso 6. Análisis del árbol lógico del MCF.	
Paso 7. Selección de tareas aplicables y efectivas de mantenimiento.	

Los cuatro primeros pasos responden al análisis estructural y funcional del objeto cuyo mantenimiento se trata de establecer. El análisis estructural apunta a individualizar los componentes o partes del objeto y observar sus relaciones. Este tipo de análisis consiste en considerar al producto tecnológico como un conjunto de elementos interactuantes, interconectados, cuyas conexiones responden a la finalidad para la cual fue construido (funciones) y es una herramienta que permite la organización de los análisis del proceso de implementación de un plan de mantenimiento basado en MCF.

Los últimos tres pasos de la metodología del MCF comprenden el análisis de los fallos funcionales categorizándolos por su impacto negativo, revelando las causas potenciales y en consecuencia la definición de mantenimiento para su prevención y corrección. Varias herramientas analíticas se incluyen en la metodología del MCF para identificar los modos de fallos funcionales y determinar las implicaciones que tienen sobre los

demás elementos del sistema. Entre estas figuraron: FMEA, *Failures Modes & Effects Analysis*, FMECA, *Failures Modes and Effect Criticality Analysis* y RCFA, *Root Cause of Failure Analysis*.

Análisis estructural del exoesqueleto

El exoesqueleto se consideró como un sistema integrado por tres subsistemas: el subsistema de software, el de control y el mecánico. El sistema constituido por los tres subsistemas descritos anteriormente tiene como función general producir el movimiento suave y progresivo de las articulaciones afectadas del miembro superior (hombro y codo) del paciente en el rango de desplazamientos y velocidad prescritos por el médico en la rutina.

1. Selección del sistema: comienza a nivel de sistema exoesqueleto, entendiéndose que este es un conjunto de todos sus componentes (subsistemas, conjuntos, componentes) que desempeñan funciones que tributan a su función principal. Como sistema este está constituido por subsistemas funcionales independientes para cumplir con su función principal única.
2. Definición de las fronteras del sistema e interfaces (E/S): una vez definidos los subsistemas funcionales se determinaron sus límites y las interfaces de Entrada/Salida (E/S). Las interfaces aquí definidas son físicas y de intercambio de energía y datos, figura 1.

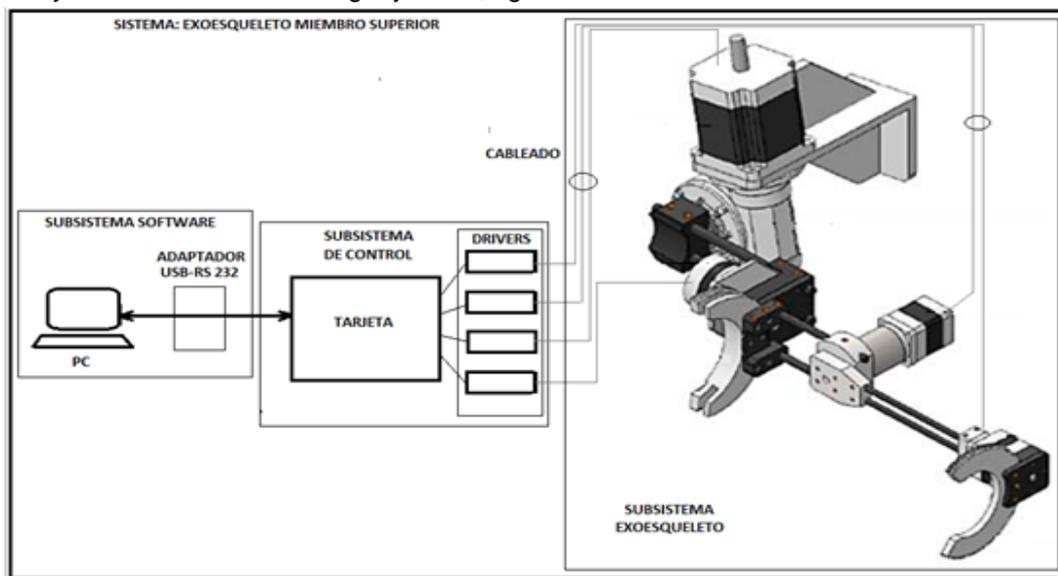


Fig. 1. Subsistemas constituyentes del exoesqueleto. Fuente: autores

Componentes e interfaces externas

Los componentes se relacionan a continuación y se detallan en la tabla 1.

Componentes

Subsistema Software:

- a) Computadora personal (SO, software programador de rutinas).
- b) Adaptador USB.

Subsistema Controlador:

- a) Placa de control (Chip).
- b) Drivers de accionamiento de los motores.

Subsistema Mecánico:

- a) Estructura mecánica del brazo.
- b) Motores eléctricos (P-P).
- c) Reductores.
- d) Cintas de unión al brazo del paciente.

Tabla 1. Tipos de interfaces externas del exoesqueleto. Fuente: autores

E/S	Tipo	Sistema origen	Sub / Sistema Destino
E	Energía Eléctrica	Red del local	Subsistema software Subsistema Controlador
E	Comandos del fisiatra	Humana	Subsistema software
S	Movimientos de rutinas	Humana	Subsistema Exoesqueleto
E	Fijación a la pared	Física	Subsistema Controlador Subsistema Exoesqueleto

Es importante señalar que se trata de un sistema desvinculado de otros equipos de la sala de rehabilitación donde se encuentra. Las únicas interfaces físicas externas que tiene el sistema con el medio es el anclaje mediante pernos de la caja del controlador y el brazo del exoesqueleto con la pared del recinto. En la tabla 1 se muestra la naturaleza de las interfaces del sistema con el medio indicándose si son de entrada o salida (E/S)

Componentes e interfaces Internas

Se determinaron las interfaces de enlace funcional entre los tres subsistemas del exoesqueleto, figura 2

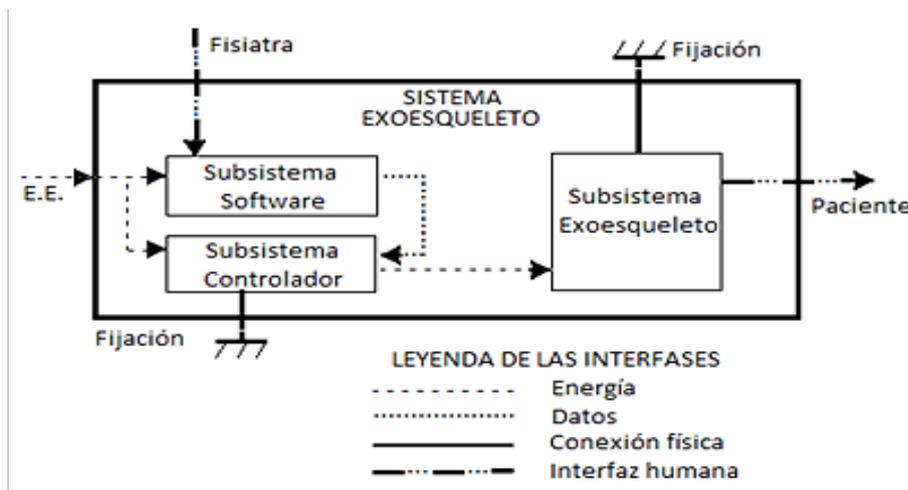


Fig. 2. Diagrama estructural de las interfaces internas del sistema. Fuente: autores

Igualmente, se describieron las interfases entre los subsistemas quedando como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Tipos de interfaces internas del exoesqueleto. Fuente: autores

Subsistema	Tipo	E/S	Origen	Eq/Subsistema Destino
Software	Datos	S	PC	Subsistema Control
Controlador	Datos	E	PC	Tarjeta
Controlador	Energía eléctrica	S	Drivers	Subsistema Exoesqueleto

Desglose en componentes de los subsistemas: cada subsistema está constituido por gran cantidad de componentes que cumplen funciones internas y que finalmente en su conjunto tributan a la función del subsistema. En la tabla 3, se listan los componentes de cada uno de los subsistemas estudiados, sobre estos recaerán las acciones de mantenimiento que se determinen.

Tabla 3. Componentes principales de cada subsistema. Fuente: autores

Subsistema Software	Subsistema Control	Subsistema Exoesqueleto
1. Computadora personal 2. Adaptador USB 3. Interfaz de software 4. Conductores	1. Chasis 2. Regulador de voltaje 3. Convertidor 4. PIC 5. Drivers	1. Placa de fijación a la pared 2. Estructura metálica 3. Moto-reductor para la flexión/ extensión y la aducción/ abducción del hombro 4. Motor- reductor para la rotación del brazo 5. Moto-reductor para la flexión/ extensión del codo 6. Moto-reductor para la pronosupinación del antebrazo 7. Cintas de sujeción al brazo del paciente 8. Cableado

Análisis funcional

Para que el sistema opere correctamente cada uno de los subsistemas constituyentes y sus interfaces deben cumplir con sus funciones técnicas específicas. A continuación, se desarrolló el análisis funcional para cada uno de los subsistemas, llegándose al diagrama mostrado en la figura 3.

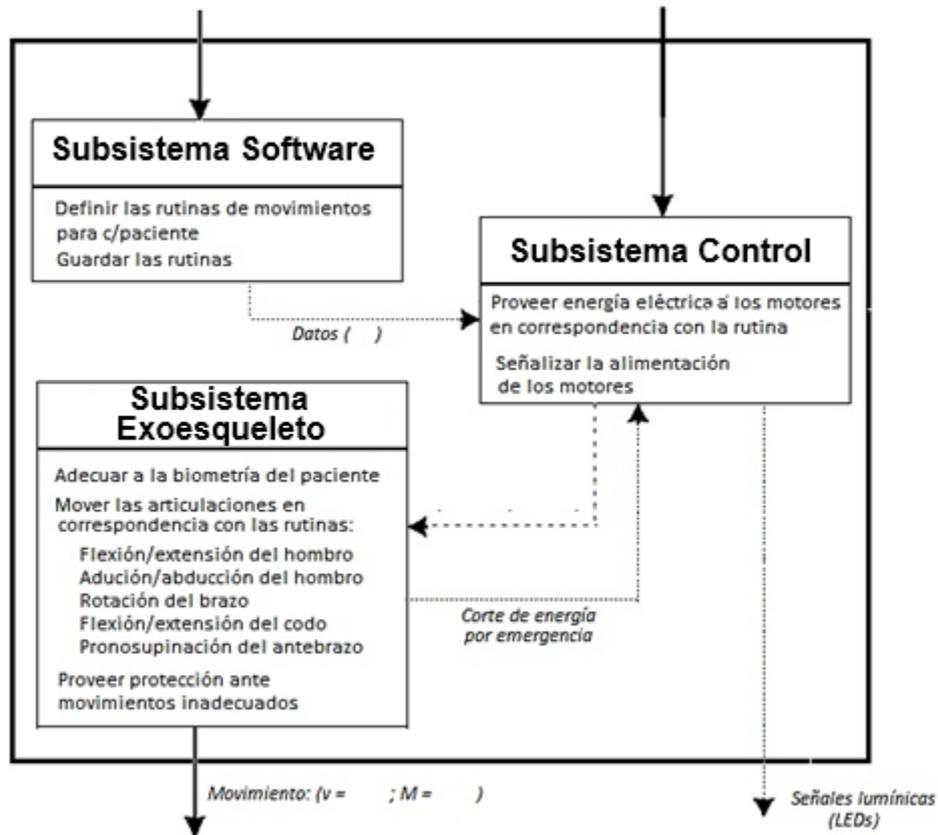


Fig. 3. Diagrama Funcional. Fuente: autores

Fallos funcionales

El fallo de un equipo de esta naturaleza se definió como el fin de su capacidad de cumplir las funciones requeridas en términos de sentido y amplitud de los movimientos, precisión y seguridad, por lo cual se ha considerado como fallo funcional cualquier conjunto de las desviaciones de las magnitudes de las interfaces del exoesqueleto a estas prioridades [14, 17], como consecuencia de mecanismos relacionados con el desgaste, corrosión, cortocircuitos de energía u otros fallos electrónicos.

Análisis de los modos de fallo funcionales potenciales

La matriz FMEA ([Norma SAE J 1739:202101](#)) se aplica a cada sistema, subsistema y componente identificado dentro de los límites definidos en el análisis estructural. Aunque básicamente se trata de una herramienta de diseño, en el caso de la definición de las tareas de mantenimiento del exoesqueleto se puede simplificar vinculándola a una secuencia de razonamiento que permite diferenciar los posibles fallos por su impacto negativo. En la figura 4 se muestra el diagrama de este razonamiento adaptado de [17] a las condiciones del exoesqueleto en estudio.

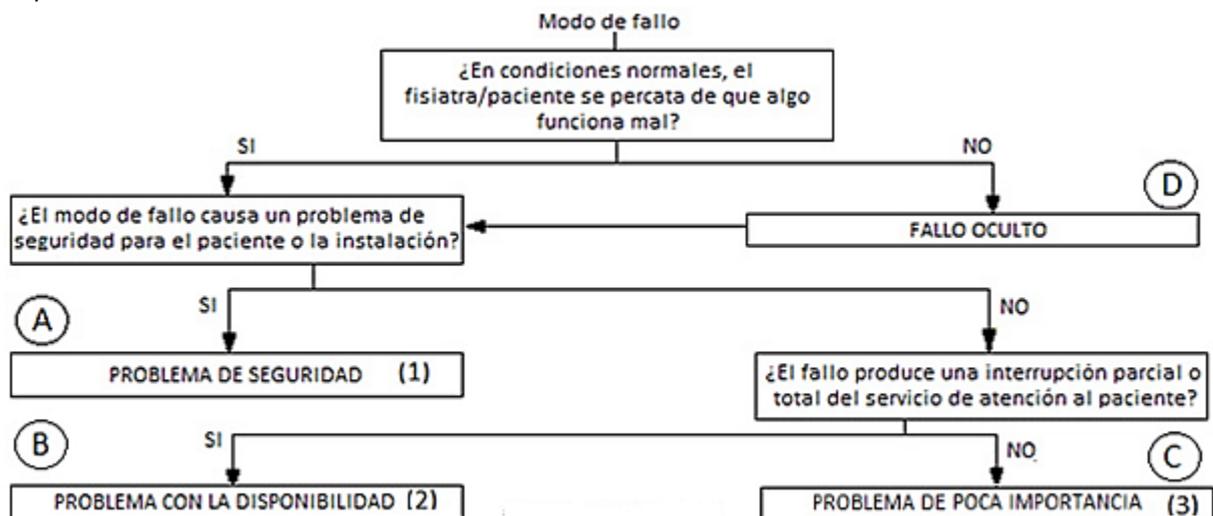


Fig. 4. Clasificación de los fallos según su impacto negativo en las funciones del exoesqueleto. Fuente: autores

Si el fallo impacta sobre la seguridad del paciente o la instalación se considera muy crítico y merecerá una atención priorizada en su prevención, estos modos de fallo clasificarán como categoría A. Si el fallo solo produce indisponibilidad del exoesqueleto y sus consecuencias no afectan el tratamiento de rehabilitación, pudiendo recuperarse las sesiones en otros momentos, el modo de fallo se clasifica como B. Si el modo de fallo no afecta la seguridad ni la disponibilidad y puede postergarse su corrección hasta el próximo mantenimiento programado o algún período de inactividad en la sala de rehabilitación, se clasifica como C. Algo muy distintivo de este procedimiento es el tratamiento de los modos de fallos ocultos, clasificados como categoría D.

Las consecuencias de los modos de fallos quedaron de la siguiente forma:

1. Los que afectan la seguridad
2. Los que afectan la capacidad de brindar el servicio
3. Los que no tienen consecuencias operacionales

Esta clasificación de los fallos, no de los subsistemas ni componentes, permite el tratamiento diferenciado de cada uno de ellos con distintas alternativas estratégicas de mantenimiento.

En la tabla 4 se muestran los fallos funcionales potenciales y sus consecuencias que resultaron de la aplicación del algoritmo de la figura 4.

Tabla 4. Clasificación de fallos y modos de fallos funcionales en el exoesqueleto. Fuente: autores

Función	Especificaciones	Fallos funcionales	¿Evidente?	Consecuencias			Categoría
				(1)	(2)	(3)	
1. Mover las articulaciones del miembro superior del paciente según la rutina	Pronosupinación del antebrazo	No hay movimiento	N	N	S	N	B
		Movimiento inverso o indeseado	N	S	N	N	A
	Flexión/extensión del codo	No hay movimiento	N	N	S	N	B
		Movimiento inverso o indeseado	N	S	N	N	A
	Rotación del brazo	No hay movimiento	N	N	S	N	B
		Movimiento inverso o indeseado	N	S	N	N	A
	Aducción/abducción del hombro	No hay movimiento	N	N	S	N	B
		Movimiento inverso o indeseado	N	S	N	N	A
Flexión/extensión del hombro	No hay movimiento	N	N	N	N	B	
	Movimiento inverso o indeseado	N	N	N	N	A	
2. Proveer protección ante movimientos inadecuados	Cortar suministro de energía al sistema cuando el paciente acciona el pedal	Se mantiene en conducción el interruptor a pesar de estar en posición de "parada"	S	S	N	N	D/A
3. Fijar el exoesqueleto al brazo del paciente	Ajustar el exoesqueleto al brazo sin molestias al paciente y sin rozamiento	Flojedad en la fijación	N	N	N	C	C

Causas de los fallos funcionales

Una vez que se identificaron los fallos funcionales y su impacto sobre el sistema, fue necesario identificar las posibles causas que los pueden originar. Con el conocimiento de las causas de los modos de fallos funcionales se pueden proponer las medidas de mantenimiento preventivo correspondiente a cada uno.

En esta investigación se apeló al criterio de los diseñadores para revelar las causas potenciales de los modos de fallos. En la tabla 5, se muestran las posibles causas que pueden provocar los modos de fallos funcionales determinados.

Tabla 5. Causas de los modos de fallos. Fuente: autores

Fallo funcional	Modo de fallo	Causas
Ausencia de movimiento.	Atascamiento del reductor.	1. Desgaste excesivo en la transmisión
		2. Rotura en dientes de engranes
		3. Rotura de cojinetes
	Rotura del dentado de la transmisión final.	1. Fallo prematuro por sobrecarga, fatiga o error de montaje
		2. Cojinetes del motor desgastados (rotor atascado)
	El motor no gira, aunque le llegue energía.	No llega energía al motor:
2. Voltaje inadecuado a la salida del regulador		
3. Circuito abierto entre el driver y el motor correspondiente		
4. No hay alimentación en la tarjeta de conversión USB/Serie		
5. No funciona el regulador de voltaje LM7805		
6. La tarjeta de control no funciona correctamente		
Movimiento indeseado.	Conexión inadecuada del motor.	1. Fallo inducido (software/controlador)
Flojedad en la fijación del exoesqueleto al brazo.	Pérdida del ajuste en la cinta velcro.	1. Falta de adhesividad en la cinta velcro

Una vez que se han identificado correctamente los modos de fallos funcionales, sus causas y efectos, se continuó con el algoritmo del MCF para definir una práctica de mantenimiento.

Árbol lógico de decisiones del MCF

Los resultados obtenidos permiten aplicar el Árbol Lógico de Decisiones (ALD) del MCF II mediante el cual se pudieron definir las tareas de mantenimiento para la prevención/corrección de cada modo de fallo.

La figura 5 muestra el ALD con la adaptación del principio de clasificación de los modos de fallos descritos en la figura 4 para el exoesqueleto en estudio.

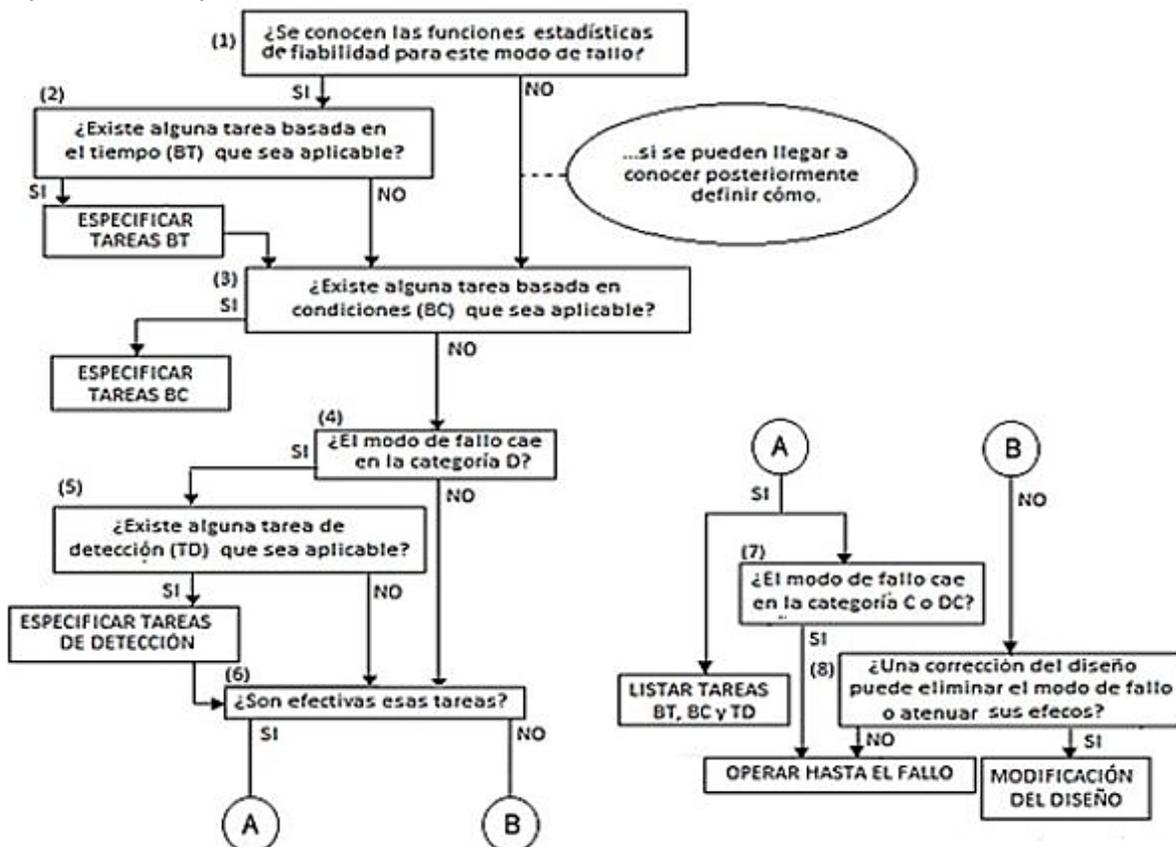


Fig. 5. Árbol lógico de decisiones del MCF. Fuente: autores

En la tabla 6 se muestran las tareas correspondientes a la prevención/corrección de los fallos deducidas de la aplicación del ALD en el exoesqueleto. Debe aclararse que los modos de fallos en las partes y miembros estructurales no fueron analizados pues sus manifestaciones son evidentes y durante el diseño se manejaron coeficientes de seguridad suficientemente altos.

Tabla 6. Relación de tareas de mantenimiento obtenidas de la aplicación del ALD del MCF. Fuente: autores

Causas	Selección de tareas					Tareas
	BT	BC	TD	TC	RD	
1. Desgaste excesivo en la transmisión	x	x		x		-Reemplazo periódico del lubricante -Reemplazar elementos desgastados -Verificar holgura angular
2. Rotura en dientes de engranes				x	x	-Reemplazar engranes -Analizar causas raíces de fallos
3. Rotura de cojinetes		x		x		-Reemplazar cojinetes -Evaluar subjetivamente ruidos y vibraciones
1. Fallo prematuro por sobrecarga, fatiga o error de montaje				x	x	-Reemplazar piñón/corona - Analizar causas raíces de fallos
1. El motor está quemado				x	x	-Reemplazar motor - Analizar causas raíces de fallos
2. Cojinetes del motor desgastados (rotor atascado)				x		-Reemplazar cojinetes
1. Se mantiene abierto el interruptor de parada de emergencia				x		-Reemplazar interruptor
2. Voltaje inadecuado a la salida del regulador				x		-Medir tensión a la salida del regulador (24/12 v) y sustituir componente
3. Circuito abierto entre el driver y el motor correspondiente				x		-Revisar integridad del cableado (bornes de fijación) hacia los motores y restablecer
4. No hay alimentación en la tarjeta de conversión USB/Serie				x		-Revisar tensión en la tarjeta de conversión -Sustituir componente
5.No funciona el regulador de voltaje LM7805				x		-Medir tensión (12/5 v) y reemplazar componentes
6. La tarjeta de control no funciona correctamente				x		-Reprogramar el PIC
1. Fallo inducido (software/controlador)			x			-Pruebas funcionales antes de cada rutina -Reprogramar el PIC
1. Falta de adhesividad en la cinta de velcro				x		-Reemplazar cintas velcro

3. Resultados y Discusión

De acuerdo con las consideraciones de los diseñadores se estudiaron seis modos de fallos potenciales, tabla 5, que fueron clasificados en:

Fallos en la categoría A (afectan la seguridad):

1. Movimiento indeseado del exoesqueleto para alguna rutina.
2. Se mantiene en conducción el interruptor de parada de emergencia (oculto).

Fallos en la categoría B (afectan la disponibilidad de la instalación):

1. Ausencia de movimiento en el exoesqueleto para alguna rutina. Este es el modo de fallo que más se analizó si se tiene en cuenta que el exoesqueleto puede brindar cinco rutinas diferentes.

Fallos en la categoría C:

1. Flojedad en las cintas de fijación del brazo del paciente al exoesqueleto

En el caso del exoesqueleto se observa un gran número de causas de fallos que no describen una evolución de estos hasta su manifestación. Estos son casos típicos de modos de fallos que tienen que ser tratados

obligatoriamente por mantenimientos correctivos. En las tablas 7 y 8 se han agrupado las tareas de mantenimiento por su tipo.

Tabla 7. Resumen de las tareas de mantenimiento correctivo. Fuente: Autores

Componente	Tarea de diagnóstico/búsqueda	Tarea correctiva
Motores paso a paso	Evaluación de temperatura y olores	Reemplazar motor. Reemplazar cojinetes.
Reductores	Medir holguras angulares y axiales Evaluación de ruidos anormales	Reemplazar elementos desgastados. Reemplazar engranes. Reemplazar cojinetes.
Transmisión final	Evaluar causas para determinar posible rediseño	Reemplazar piñón/corona.
Interruptor de parada rápida	Búsqueda de fallos ocultos, prueba de funcionalidad al inicio de cada sesión	Reemplazar interruptor.
Circuito de control	Medir tensión a la salida del regulador (24/12 v) y 12/5 v Inspección de la integridad del cableado (bornes de fijación) hacia los motores Evaluar sustitución modular del circuito de control	Sustituir componente averiado en el regulador y/o tarjeta de conversión. Reprogramar el PIC.
Fijación al brazo del paciente	Inspección visual durante el uso	Reemplazar cintas velcro.
PC		Reinstalar interfaz gráfica.

Tabla 8. Resumen de las tareas preventivas de mantenimiento en cada componente. Fuente: Autores.

Componente	Tarea	Frecuencia
Motores paso a paso	Inspección funcional, búsqueda de síntomas.	Diariamente
	Trabajos de limpieza e higienización con las sustancias apropiadas	Semanal
Reductores	Inspección funcional, búsqueda de síntomas.	Permanente
	Trabajos de limpieza e higienización con las sustancias apropiadas	Semanal
	Revisar nivel y cambio de aceite	Cada 12 meses
Interruptor de parada rápida	Prueba funcional	Al inicio de cada sesión
Circuito de control	Verificar el encendido de los LED	Permanente
	Trabajos de limpieza e higienización con las sustancias apropiadas	Semanal
	Inspeccionar aislamiento	Diariamente
Fijación al brazo del paciente	Inspección funcional	Permanente

Como es típico, la mayoría de las tareas preventivas corren a cargo de la observación permanente fisiatra, por lo que debe estar entrenado para la correcta interpretación de señales emitidas por el equipo y que puedan ser representativas de un fallo en evolución. Igualmente, se valoró el entrenamiento del personal de mantenimiento de la sala en la atención a los componentes electrónicos y su sustitución en caso de necesidad.

Es importante conservar una reserva mínima de repuestos de elementos mecánicos y electrónicos para la reparación rápida y con ello disminuir la indisponibilidad en el servicio. Con igual intención, sería conveniente disponer de módulos de reemplazo de todos los componentes que se atienden correctivamente.

La aplicación de las tareas de mantenimiento obtenidas de la aplicación de la metodología del MCF, ha permitido un servicio sostenido del exoesqueleto para la rehabilitación del miembro superior en la sala de fisioterapia del hospital Dr. Juan Bruno Zayas en la ciudad de Santiago de Cuba.

Se han insertado dentro del plan de mantenimiento de los equipos de la sala de rehabilitación las tareas declaradas y se ha preparado al personal de fisioterapia y de mantenimiento en las prácticas de la ejecución de las mismas.

Conclusiones

El exoesqueleto, objeto de investigación, se encuentra ofreciendo servicios diarios llevándose a cabo estudios relacionados con la rehabilitación del hombro doloroso del paciente hemipléjico y el tratamiento de la capsulitis. En todo el período se han reportado tres fallos: dos provenientes de los sistemas electrónicos que se resolvieron en breve tiempo mediante la reprogramación del PIC y uno mecánico heredado de defectos de elaboración en un engrane de un reductor. Los aportes de la aplicación del MCF son básicamente prácticos y se reflejan en la baja tasa de fallos observados en el período de trabajo.

Referencias

- Demofonti A, Carpino G, Zollo L, Johnson MJ. Affordable Robotics for Upper Limb Stroke Rehabilitation in Developing Countries: A Systematic Review. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*. 2021;3:11-20. DOI: [10.1109/TMRB.2021.3054462](https://doi.org/10.1109/TMRB.2021.3054462)
- Heng W, Solomon S, Gao W. Flexible Electronics and Devices as Human–Machine Interfaces for Medical Robotics. *Adv Mater*. 2022;34(16):2107902. <https://doi.org/10.1002/adma.202107902>
- Peng Z, Huang J. Soft Rehabilitation and Nursing-Care Robots: A Review and Future Outlook. *Appl Sci*. 2019;9(15). <https://doi.org/10.3390/app9153102>
- Awad LN, Esquenazi A, Francisco GE, Nolan KJ, Jayaraman A. The ReWalk ReStore™ soft robotic exosuit: a multi-site clinical trial of the safety, reliability, and feasibility of exosuit-augmented post-stroke gait rehabilitation. *J NeuroEngineering Rehabil*. 2020;18;17(1):80. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00702-5>
- Buchs NC, Pugin F, Volonté F, Morel P. Reliability of robotic system during general surgical procedures in a university hospital. *Am J Surg*. 2014;207(1):84-8. DOI: 10.1016/j.amjsurg.2013.06.007.
- Wang Y, Ai Q, Zhao W, Gao Y, Liu Q, Shi T, et al. Safety and Reliability of a Robot-assisted Laparoscopic Telesurgery System: Expanding Indications in Urological Surgery. *Eur Urol*. 2024;85(5):506-507. DOI: 10.1016/j.eururo.2023.11.002.
- Serrezuela RR, Quezada MT, Zayas MH, Pedrón AM, Hermosilla DM, Zamora RS. Robotic therapy for the hemiplegic shoulder pain: a pilot study. *J NeuroEng Rehabil*. 2020;17(1):54. DOI: 10.1186/s12984-020-00674-6.
- Broche L, Sagaro Zamora R, Rodríguez R, Castañeira J. Digital Twin: An option for the integrated design of upper limb robotic exoskeletons for rehabilitation tasks. *J Eng Appl Sci*. 2021;16(6):423–4.
- Mishra RC, Pathak K. *Maintenance Engineering and Management*. 2nd edition. New Delhi, India: PHI Learning Privated Limited; 2012.
- Shi Y, Zhu W, Xiang Y, Feng Q. Condition-based maintenance optimization for multi-component systems subject to a system reliability requirement. *Reliab Eng Syst Saf*. 2022;219:108174. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108174>
- Zhao J, Gao C, Tang T. A Review of Sustainable Maintenance Strategies for Single Component and Multicomponent Equipment. *Sustainability*. 2022;14(5): 2992; <https://doi.org/10.3390/su14052992>
- Pincirolì L, Baraldi P, Zio E. Maintenance optimization in industry 4.0. *Reliab Eng Syst Saf*. 2023;234:109204. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109204>
- Özgür Ünlüakın D, Türkali B, Aksezer SÇ. Cost-effective fault diagnosis of a multi-component dynamic system under corrective maintenance. *Appl Soft Comput*. 2021;102:107092. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107092>
- Moubray J. *Reliability-centered Maintenance*. 2nd edition. New York: Industrial Press Inc.; 2001.
- Woo S. *Reliability design of mechanical systems A guide for mechanical and civil Engineers*. 2nd edition. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd; 2020. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-50829-0>
- Woo S. *Design of Mechanical Systems: Accelerated Lifecycle Testing and Reliability*. Springer International Publishing; 2024.
- Wang Y, Deng C, Wu J, Wang Y, Xiong Y. A corrective maintenance scheme for engineering equipment. *Eng Fail Anal*. 2014;36:269–83. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.10.006>

Editores:

Alberto Julio Rodríguez Piñeiro, Armando Díaz Concepción.
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Segismundo Mojícar Caballero. <https://orcid.org/0000-0002-8395-4138>

Participó como autor principal en el diseño de la investigación del trabajo, búsqueda de la información y trabajó todo lo relacionado con el mantenimiento del sistema mecánico, procesamiento de la información y discusión de los resultados. Trabajó en la revisión crítica del contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Jorge Bonzon Regalado. <https://orcid.org/0000-0002-4898-6505>

Participó en la recopilación de toda la información necesaria respecto al funcionamiento del equipo y su experiencia en la explotación durante los estudios piloto practicados. Participó en la escritura del trabajo y la redacción de las tablas y realización de las figuras. Trabajó en la revisión crítica del contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Daily Milanés Hermosilla. <https://orcid.org/0000-0003-4463-9263>

Trabajó en la evaluación de diagnóstico de los sistemas de alimentación y control del exoesqueleto realizando todos los análisis correspondientes a los mencionados subsistemas. Trabajó en el desarrollo del plan de mantenimiento del exoesqueleto. Trabajó en la revisión crítica del contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Mauricio Torres Quezada. <https://orcid.org/0000-0001-5567-5636>

Como especialista de diseño y manufactura que participó en el diseño y construcción del equipo aportó todos los elementos relacionados con sus modos de actuación y los posibles fallos del sistema mecánico del equipo. Trabajó en la revisión crítica del contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Ruthber Rodríguez Serrezuela. <https://orcid.org/0000-0002-0405-0692>

Especialista en control automático que trabajó en el sistema de control automático del exoesqueleto y en sus pruebas en estudios piloto. Aportó los elementos para el análisis de la fiabilidad de este subsistema. Trabajó en la revisión crítica del contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Roberto Sagaró Zamora. <https://orcid.org/0000-0001-5808-1999>

Dirigió el colectivo de autores que diseñó y fabricó el equipo y aportó todos los elementos relacionados con la concepción del diseño y explotación del equipo, aportando todos los elementos relacionados con la explotación del equipo y todos sus subsistemas mecánicos a lo largo de casi 8 años de trabajo. Participó en la elaboración del plan de mantenimiento vigente del equipo. Trabajó en la revisión crítica del contenido, redacción y aprobación del trabajo final.