

Consideraciones en el diseño de robots para la atención médica en el mundo post COVID-19

Considerations in designing robots for healthcare in the post COVID-19 world

Mauricio Enrique Reyes-Castillo¹, Andrés Joaquín Fonseca-Murillo¹, Carlos Ricardo Cruz-Mendoza²✉

¹ Centro de Investigaciones de Diseño Industrial, Universidad Nacional Autónoma de México.

² Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, Universidad Nacional Autónoma de México.

RESUMEN

A finales de 2019, la pandemia de COVID-19 se extendió rápidamente por todo el mundo. Como resultado de las dificultades derivadas de esta situación sanitaria emergente, se propuso utilizar robots en áreas médicas específicas. A partir de esto, el sector médico mundial aumentó el uso de robots de servicio para automatizar tareas repetitivas y riesgosas, así como para el transporte, almacenaje, entrega de alimentos, medicamentos y suministros. Sin embargo, la pandemia forzó la implementación de nuevos protocolos de interacción con los que se puso en evidencia el desarrollo incipiente de tales sistemas, demostrando su muy poca capacidad para hacer frente a las necesidades que conlleva la actual situación. En este artículo se presentan algunas consideraciones para la manufactura de sistemas, de acuerdo a criterios de diseño de productos biomédicos. Finalmente, se mencionan algunos problemas y retos que enfrentarán los desarrollos robóticos médicos en el futuro post pandemia.

PALABRAS CLAVE: robots de servicio; diseño de producto; equipos biomédicos; COVID-19; mundo post COVID-19.

ABSTRACT

At the end of 2019, the COVID-19 pandemic spread rapidly throughout the world. As a result of the difficulties arising from this emerging health situation, it was proposed to use robots in specific medical areas. Thereon, world health sector increased the use of service robots to automate repetitive and risky tasks, as well as for the transport, storage, delivery of food, medicines and supplies. However, the pandemic forced the implementation of new interaction protocols, which revealed the incipient development of such systems, demonstrating their very little capacity to meet the needs of the current situation. In this article, some considerations are presented for the manufacture of systems according to design criteria for biomedical products. Finally, some problems and challenges, that medical robotic developments will face in the post-pandemic future are mentioned.

KEYWORDS: service robots; product design, biomedical equipment, COVID-19, post COVID-19 world.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Carlos Ricardo Cruz-Mendoza
INSTITUCIÓN: Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas / UNAM
DIRECCIÓN: Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México, C. P. 04510.
CORREO ELECTRÓNICO: cricardo.cruz@iimas.unam.mx

Fecha de recepción: 30 de septiembre de 2021. **Fecha de aceptación:** 1 de abril de 2022. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2022.



I. INTRODUCCIÓN

El diseño industrial ha contribuido de manera multidisciplinaria al desarrollo de sistemas robóticos para la medicina. Las áreas con las que se interactúa son principalmente las ingenierías y los servicios de la salud. El acceso al desarrollo de nuevos productos derivados de la actual revolución industrial o Industria 4.0 (i4.0), necesita de la intervención de diferentes especialistas, además de considerar aspectos éticos, humanísticos y de sustentabilidad. La robótica encontró un nicho de crecimiento con la pandemia actual, ya que forzó nuevas formas y protocolos de interacción aumentando el uso de robots en hospitales y centros de salud. Los sistemas robóticos tienen diversas ventajas, principalmente por la poca o nula posibilidad de propagación directa del virus al utilizar el sistema en un modo humano-robot-humano. Con esta implementación, los entornos presentan una disminución en el riesgo biológico, considerando además otros factores de seguridad.

En los últimos años, el uso de robots en los entornos médicos ha ido en aumento [1]. Existen avances importantes respecto a sus aplicaciones orientadas a la solución de problemas de logística, específicamente durante el desplazamiento de objetos [2], [3], entrega de suministros [4] o manejo de sustancias peligrosas [5]. Los robots de servicio en las áreas médicas contribuyen a la transformación de los servicios de salud al realizar tareas de manera automatizada, de forma remota y liberando tiempo de servicio del personal. Los robots están mostrando un enorme potencial en la lucha contra este virus al realizar actividades rutinarias que requieren una gran cantidad de trabajo humano, principalmente en tareas como manipular suministros médicos y desechos de riesgo biológico, detección, pruebas, limpieza, cirugía, telesalud, telemedicina y servicios sociales en modo teleasistencia.

La situación sanitaria mundial evidenció que la generación actual de robots de servicio no está preparada para los retos que surgieron con la pandemia prevaliente. Se requiere de sistemas capaces de apoyar con mayor eficiencia a especialistas, colaboradores y pacientes. Aunado a esto, el entorno latinoamericano sufre de un rezago en la manufactura, implementación e innovación para la robótica aplicadas al servicio de las personas, sin embargo, el entorno académico contribuye en cierta medida con investigación y desarrollo [6], [7]. En este trabajo se habla sobre las características de

los robots de servicio y las diversas aplicaciones implementadas en el contexto de la pandemia y se consideran, al mismo tiempo, las fases que plantea la Organización Mundial de la Salud [8] (Figura 1). Más adelante, se describen algunas consideraciones para el diseño, desarrollo y manufactura de robots. Se analizan también algunos factores de seguridad implícitos durante la interacción con personas y sistemas. Finalmente, se mencionan las características generales de un posible mundo post COVID dignas de considerar durante el diseño de sistemas robóticos.

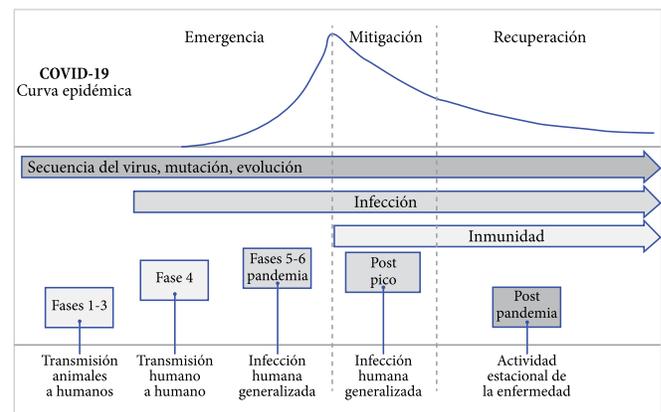


Figura 1. Curva epidémica de la COVID-19 y las fases de alerta de una pandemia [8].

A. Los robots de servicio

El concepto *robot de servicio* se refiere a una entidad que es capaz de realizar un conjunto de comportamientos básicos utilizados durante la ejecución de tareas complejas [6], teniendo la facultad de llevar a cabo estas actividades en ambientes reales [9]. Su estructura de funcionamiento es gracias a la base de información ligada a sus capacidades, conocidas como habilidades o comportamientos, las cuales pueden representarse como un conjunto de procesos subsecuentes y organizados hacia el cumplimiento de una o varias tareas. Los robots de servicio pueden interactuar con personas o llevar a cabo colaboraciones con otros sistemas tecnológicos para un fin común [10].

Los robots de servicio utilizan sensores, motores y actuadores que les permiten reconocer las características del entorno, focalizar objetos, reconocer personas, captar audio o voz, trasladarse o navegar en un espacio definido, identificar áreas y manipular objetos. Dependiendo de los datos obtenidos por los sensores de los equipos, los robots pueden programarse para reaccionar de for-

ma inmediata o realizar tareas compuestas, que bien podrían entenderse como un conjunto de comportamientos básicos que complementan un objetivo mayor, p. ej., “Trae un vaso o ve a la cocina”. Para completar una tarea compleja, el sistema descompone la actividad en varias actividades simples hasta formar una secuencia compuesta que le permita avanzar progresivamente hasta completar el objetivo [11]. Un robot de servicio debería ser capaz seguir instrucciones con la información almacenada en su sistema o su base de conocimientos, aunado a la interpretación del entorno [12].

El concepto y estructura funcional de un robot de servicio se determina a partir de la integración de los elementos físicos que lo conforman (hardware) y el conjunto organizado de datos que corresponden a la programación, algoritmos y arquitecturas (software). Un robot está definido por la relación existente entre las entradas y salidas del sistema, en donde sucede la transferencia de información entre lo registrado y la respuesta correspondiente. La capacidad de un robot de servicio se configura por: a) interpretar y reconocer representaciones externas en el entorno y b) especificar y generar una respuesta a través de procesos cognitivos artificiales, organizados por la ejecución de acciones y comportamientos en relación al estado de la tarea y su situación en el entorno [6]. Los robots de servicio se encuentran ligados a la ejecución de tareas específicas y el sistema puede adaptarse ante situaciones y ofrecer respuestas de acuerdo a la situación prevaleciente. Sin embargo, un sistema robótico expuesto a un ambiente variable reduce altamente su desempeño. Esto da pauta para implementar robots inmersos en áreas de aplicación perfectamente definidas, aumentando así la capacidad de ejecución del equipo y sistemas involucrados.

B. LOS ROBOTS DE SERVICIO EN ATENCIÓN MÉDICA

Durante la pandemia de COVID-19 se han utilizado robots con distintas capacidades, entre los que destacan los robots de servicio o los especializados únicamente en interacción social. En la siguiente sección se revisan distintos sistemas, su avance tecnológico, las áreas en las que se implementaron, las tareas que efectúan y sus características formales.

TELEMEDICINA

Uno de los robots diseñados para realizar tareas repetitivas que resultan estresantes para el personal de en-

fermería al interactuar con pacientes infectados, es el asistente semiteleoperado de enfermería TRINA, una versión actual del Rethink Robotics Baxter. El robot es un humanoide de doble brazo, con un torso (Rethink Robotics Baxter), una base móvil omnidireccional (HStar AMP-I) y pinzas con tres dedos en cada mano para proporcionar capacidades de manipulación y navegación en interiores (en la mano derecha tiene una pinza Robotics ReFlex). El operador utiliza una pantalla de telepresencia, un micrófono y altavoces para permitir comunicación bidireccional audiovisual con los pacientes y con el grupo de trabajadores sanitarios [13].

El robot de telepresencia TEMI [14] permite atender y tratar a los pacientes de forma remota, aunque no fue diseñado originalmente para el cuidado de la salud. Para facilitar esta nueva tarea se le proveyó con una cámara térmica, un termómetro y otros sensores que permiten al personal del hospital realizar teleconsultas sin poner su salud en peligro. En un artículo, Yang *et al.* [15] muestran un sistema de teleoperación para la atención remota dentro de una sala de aislamiento, con el fin de reducir el riesgo de contacto entre los pacientes y el personal sanitario. Este sistema de telepresencia tiene una tableta montada en la parte frontal que se utiliza para hacer todos los días chequeos médicos remotamente, una función de activación por voz que facilita la interacción con el paciente y al mismo tiempo monitorea su estado emocional. Además, tiene la capacidad de realizar auscultaciones remotas con un estetoscopio de ultrasonido Doppler conectado al extremo de su brazo y puede entregar objetos, usando un brazo robótico de dos dedos.

En México también existen desarrollos de este tipo. Un proyecto apoyado por Intel y Amazon para la detección y escaneo de síntomas es ROOMIE BOT [16], que cuenta con un termómetro y un oxímetro para detectar síntomas como fiebre y disnea, e incluye un avanzado sistema de cámaras que pueden detectar, analizar y reconocer rostros en tiempo real. Además, tiene un sistema de lenguaje natural para lograr conversaciones más fluidas. Este robot puede atender pacientes y preguntarles acerca de sus síntomas [17], también es capaz de identificar otras afectaciones como cefalea, rinorrea, conjuntivitis, dolor torácico, odinofagia y tos.

ESCANEO

Una forma económica y eficaz de ayudar a identificar y controlar la COVID-19 es la detección por escaneo

de síntomas relacionados. La plataforma robótica cuadrúpeda móvil de Boston Dynamics, Dr. SPOT, desarrollada para uso en exteriores [18], está equipada con termómetros de alta precisión y puede monitorear los signos vitales sin contacto. AIMBOT, de Ubtech, es otro robot que con sus cámaras HD e infrarrojas puede escanear hasta 200 personas por minuto [19]. También está MISTY, capaz de evaluar a una persona además de hacer preguntas pertinentes para la detección inmediata [20].

MANIPULACIÓN DE SUMINISTROS MÉDICOS

En el Hospital de la Universidad de Aalborg, en Dinamarca, se instalaron dos robots KUKA para ayudar al personal médico a clasificar las muestras de sangre. Anteriormente, el personal del laboratorio manipulaba las cajas de transporte a la llegada, extraía las muestras de sangre y las clasificaba para su posterior análisis clínico [21]. Para una aplicación que ayuda a los hospitales en las pruebas serológicas (estudio de anticuerpos en suero sanguíneo), se utilizó a YUMI, un robot diseñado en el Politecnico di Milano, en asociación con IEO, y producido por la compañía Abb robotics [22]. Otra tarea recurrente es la elaboración de vacunas; por tanto, se necesitan más robots para automatizar las tareas médicas repetitivas, como la citada anteriormente o como las pruebas de muestras.

MANIPULACIÓN DE DESECHOS DE RIESGO BIOLÓGICO

El método comúnmente utilizado para eliminar los desechos médicos generados en hospitales incluye la recolección, clasificación e incineración. Este último es un proceso que quema los desechos en un ambiente controlado. Sin embargo, los procesos más peligrosos para el personal médico son la recolección, la clasificación y el transporte de los desechos de riesgo biológico para su eliminación. Cleveland Clinic está utilizando 100 robots que recolectan los desechos en diferentes contenedores para su clasificación; cuando el robot ha recogido los desechos, se traslada a una habitación especial y los entrega a otra máquina para su esterilización e incineración [23].

HISOPADO NASOFARÍNGEO

El hisopado es el método tradicional utilizado para recolectar muestras en la prueba de detección en COVID-19. La toma manual expone inevitablemente al personal médico a posibles infecciones y este tipo de recolección

no puede satisfacer la gran demanda de análisis que se requieren. LifeLine Robotics creó comercialmente el primer robot autónomo para hisopado de garganta del mundo, el cual puede aminorar el trabajo al personal médico [24]. El robot prepara el recipiente para recoger la muestra, previamente etiquetado y fechado. Cuando el paciente abre la boca, el robot toma un hisopo e identifica los puntos correctos en la garganta mediante el uso de un sistema de visión artificial, toma la muestra y procede a colocar el hisopo en el recipiente, enrosca la tapa y la guarda, para iniciar de nuevo el protocolo.

LIMPIEZA

Los robots de servicio son ideales para prevenir enfermedades en lugares que son de alto riesgo para los humanos, tales como minería, plantas nucleares, mantenimiento y áreas de desinfección y limpieza en hospitales. Los robots de limpieza de servicio se pueden dividir en tres ramas principales: a base de luz, a base líquida y mixtos.

Desinfección a base de luz. Una forma común de eliminar patógenos es utilizar la tecnología ultravioleta (UV). Existen tres tipos de luces UV: UV-A (315 a 400 nanómetros), UV-B (280 hasta 315 nm) y UV-C (100 a 280 nm). Los rayos UV-A y UV-B provocan quemaduras solares en los seres humanos, sin embargo, los rayos UV-C, aunque son más intensos, no penetran la atmósfera y además pueden ser producidos artificialmente y se utilizan con frecuencia para la desinfección. Los rayos UV en general están relacionados con el desarrollo del cáncer, por lo tanto, estos servicios deben hacerse sin presencia humana y por estas razones los robots de servicio autónomos son ideales para la desinfección. El robot XENEX limpia superficies utilizando luz ultravioleta xenón pulsada (PPX-UV) [25]. El robot UVD es otro robot de servicio que se mueve de forma autónoma a través de una habitación, utilizando luz ultravioleta-C para atacar el ARN en un virus y el ADN en bacterias, destruyendo efectivamente la capacidad del virus para infectar a las personas y multiplicarse [26]. El AKARA ROBOT es un sistema para desinfección que puede detectar personas y apagar su emisor si es necesario. Básicamente, es una plataforma móvil con una sola lámpara UV-C unida a la parte superior [27]. El Robot UV del MIT se compone de una base comercial de AVA Robotics junto con un controlador de luz UV personalizado [28]. LAVENDER, el robot de desinfección inteligente UVC, destruye el 99.99 % de los patógenos utili-

zando luces ultravioletas y navega de forma autónoma y segura para la esterilización de espacios [29].

Desinfección a base de líquidos. Otra forma común de esterilización bacteriana es usar agentes líquidos. La empresa Aobo desarrolló un robot de desinfección a base de líquido equipado con un rociador de 360 grados, especializado en la desinfección y esterilización de áreas determinadas y cuenta con navegación láser y evasión ultrasónica de obstáculos [30]. GeekC Technology Co. desarrolló otro robot llamado JASMIN que utiliza agentes líquidos para una esterilización rápida y automatizada. Al igual que el robot UV Lavender de la misma compañía, son robots móviles autónomos. El robot AIMBOT de Ubtech también se adaptó para su funcionamiento con agentes líquidos en aerosol con la función de desinfectar áreas interiores, como hospitales y salas de atención médica [19]. Ai-aitech desarrolló un robot de desinfección comercial que utiliza válvulas automatizadas de alta presión para la esterilización [31].

Desinfección de base mixta. Existen robots que mezclan la desinfección a base de luz con la desinfección líquida para aumentar su eficiencia. Como ejemplo, el robot de desinfección M2 de Keenon desinfecta con cuatro lámparas UV-C de onda corta y un rociador de líquido que puede rociar en un radio de 5 metros y desinfectar una habitación hospitalaria con dimensiones promedio en 15 minutos [32].

INTERACCIÓN SOCIAL

Las acciones para reducir la propagación de COVID-19 están centradas mayormente en el distanciamiento, desde el aislamiento generalizado hasta el distanciamiento personal en espacios sociales, siendo los centros de salud los que requieren mayor control. El impacto psicológico por el cambio en las estrategias de convivencia para la atención interpersonal en hospitales y centros de atención, ha impulsado el desarrollo de robots interactivos de servicio y sociales. Otras capacidades de los robots de servicio, aunadas a su sistema computacional electromecánico programado, ensamblado y diseñado para su integración en entornos sociales, es la generación de comportamientos reactivos dirigidos al cumplimiento de tareas, basándose únicamente en comunicación por medio de interfaces gráficas y naturales humanas como lenguaje, gesticulación, seguimiento ocular, expresión facial, comportamiento emocional y lenguaje corporal, entre otras [33], [34], [35]. Esta situación estimuló la crea-

ción de robots capaces de compartir las cargas de trabajo en tales entornos. Pal Robotics adaptó sus robots a la atención social, explorando formas de combatir la COVID-19 [36]; similar a TEMI, Pal Robotics ARI [37], fue diseñado para usos diversos. ARI se utilizó como recepcionista en hospitales con el fin de aclarar dudas generales y controlar el flujo de nuevos usuarios en salas de ingreso, además de realizar seguimiento y asistencia a los afectados por COVID-19 que requieran ser aislados. ARI se puede teleoperar, ofrece interacciones sociales continuas y se adhiere a los regímenes de tratamiento con menor riesgo de propagar el virus.

Las empresas UBTECH Robotics (hardware) y ZoraBots (software), a través del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), han donado a Hospitales de Ruanda cinco robots CRUZR para combatir la COVID-19 [38]. Estos robots se utilizan para monitorear la temperatura de los trabajadores sanitarios y los pacientes. Además, según los trabajadores, el robot podría hablar con personas en la lengua materna (francés), lo que muestra una ventaja considerable en la transferencia de información. La empresa Diligent Robots ha desarrollado el robot MOXI para ayudar al personal médico. MOXI puede entregar muestras de laboratorio, buscar artículos del suministro central, recolectar productos para pacientes, distribuir equipo de protección personal y entregar medicamentos [39].

La revisión sobre los sistemas robóticos de servicio en atención médica, sirve para entender las necesidades emergentes que establecen una base en su diseño y desarrollo. Con este fin, se presenta una tabla con las características de los robots mencionados considerando las fases de la pandemia, las áreas de uso en centros hospitalarios, su aplicación, grado de avance, las capacidades y los diferentes usuarios que intervienen (Tabla 1). De esta forma, se pretende abrir el horizonte respecto al estado del arte, los parámetros generales para su diseño y las necesidades para desarrollos a futuro, tomando en cuenta los posibles retos a los que se enfrenta su implementación. Se encontró también que el diseño estructural es recurrente en los sistemas analizados (Figura 2), con cuatro conceptos básicos: 1) limpieza y desinfección, 2) humanoides de servicio o sociales, 3) teleoperación y 4) manipulación en plataformas móviles o estáticas.

El desarrollo e implementación de robots de servicio en hospitales, requiere de conocimientos multidisciplinarios. Por tal motivo, para el diseñador de artefactos mé-

TABLA 1
REVISIÓN GENERAL DE SISTEMAS ROBÓTICOS DESARROLLADOS DURANTE LA PANDEMIA DE COVID-19

ROBOTS	FASE	ÁREAS	APLICACIÓN	AVANCE	CAPACIDADES	USUARIOS
TRINA	Fase 5 a fase post pandemia	Cirugía general, cuarto de recuperación	Telemedicina	En desarrollo	Plataforma móvil y estática. Manipulación	Operador, médico y especialista de la salud
Temi	Fase 5 a fase post pandemia	Admisión, control de infecciones, trabajo social, cuidados en el hogar	Telemedicina	En activo	De interacción humana. Plataforma móvil	Operador y paciente
Robot de Yang et al.	Fase 5 a fase post pandemia	Admisión, seguridad, control de infecciones	Telemedicina	En desarrollo	Plataforma móvil y estática. Manipulación	Operador y paciente
Dr. Spot	Fase 5 y 6	Admisión, control de infecciones	Telemedicina, escaneo	En desarrollo	Plataforma móvil para interacción humano robot	Pacientes y visitantes
Aimbot y Misty	Fase 5 a fase post pico	Admisión	Telemedicina, escaneo	En activo	Plataforma móvil para interacción humano robot	Pacientes, visitantes y médicos
Kuka Robots	Fase 4 a 6	Laboratorio, control de infecciones	Manipulación, muestreo de sangre	En desarrollo	Plataforma estática. Manipulación	Operador, laboratorista y paciente
ABB YUMI	Fase 4 a 6	Laboratorio, control de infecciones	Manipulación, desarrollo de vacunas	En desarrollo	Plataforma estática. Manipulación	Operador, laboratorista y paciente
Zen Robotics	Fase 4 a 6	Laboratorio, control de infecciones	Manipulación, riesgo biológico	En desarrollo	Plataforma estática. Manipulación	Operador, laboratorista y paciente
Lifeline Robotics	Fase 4 a 6	Laboratorio, control de infecciones	Manipulación, hisopado	En desarrollo	Plataforma móvil, Manipulación	Operador y paciente
Xenex, UVD robots, Akara robot, MIT-UV, Lavender	Fase 5 a fase post pandemia	Áreas generales: cirugía, cuidados intensivos, radioterapia, control de infecciones, recuperación	Limpieza. Desinfección Base UV	En activo	Plataforma móvil	Operador
Ai-aitech, Aobo, Aimbot, Jasmin, Keenon	Fase 5 a fase Post pandemia	Áreas generales	Limpieza. Desinfección Base líquida y mixta	En activo	Plataforma móvil	Operador
PAL/ARI, Cruzr	Fase 5 a fase post pandemia	Admisión, cuidados de salud y seguridad	Social Humanoide	En desarrollo	Plataforma móvil para interacción humano robot	Operador y paciente
Moxi	Fase 5 a fase post pandemia	Admisión, cuidados de salud y seguridad	Social Humanoide	En desarrollo	Plataforma móvil para interacción humano robot	Operador, paciente, médico

dicos es importante tener en cuenta la bioingeniería, la ingeniería mecánica, biomédica, eléctrica, electrónica, química y computacional, además de los factores humanos, el diseño industrial, la manufactura y consideraciones sobre impacto ambiental.

En los siguientes apartados se abordará de manera breve el proceso de diseño para productos biomédicos presentados en la [Figura 3](#), acordes con los factores generales de ingeniería y diseño [40].

II. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La creación de robots para entornos de salud debe considerar el proceso de diseño para dispositivos biomé-

dicos que se nombró anteriormente, ya que en este se encuentran varios factores esenciales, sobre todo los concernientes a usuarios, usabilidad y manufactura, acordes con las tecnologías emergentes dentro de nuestro entorno. Además, es importante tomar en cuenta las actuales pautas de seguridad para robots de cuidado personal, ya que influyen directamente en el diseño de tales sistemas. Todo esto se relaciona y surge al tener en cuenta el ciclo de vida del producto, el cual servirá de esquema general para el desarrollo.

A continuación, se describen algunas consideraciones basadas en dicho ciclo, incluyendo además una breve descripción del mundo post pandemia.

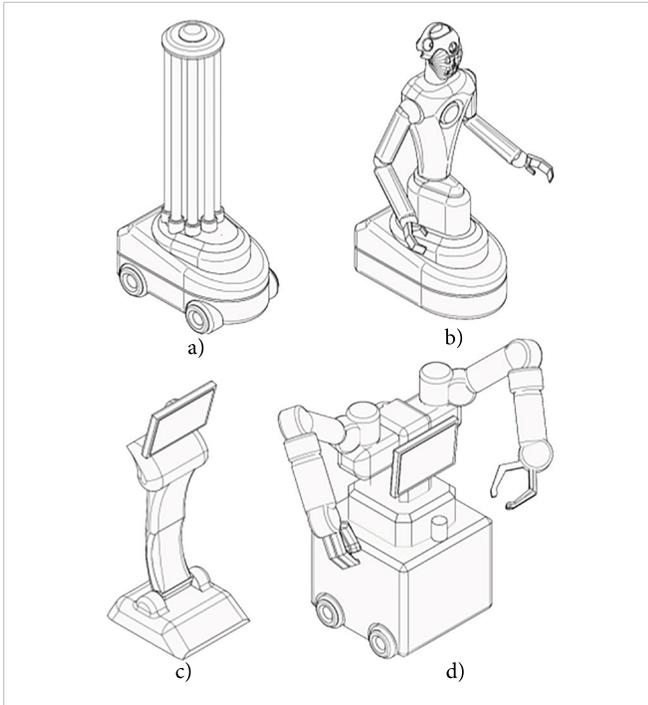


Figura 2. Configuración formal y características generales de los robots implementados en los entornos médicos durante la pandemia por COVID-19: a) Limpieza, b) Humanoides sociales y de servicio, c) Teleoperación / Telemedicina y d) Manipulación (móviles o fijos). Elaboración de los autores.

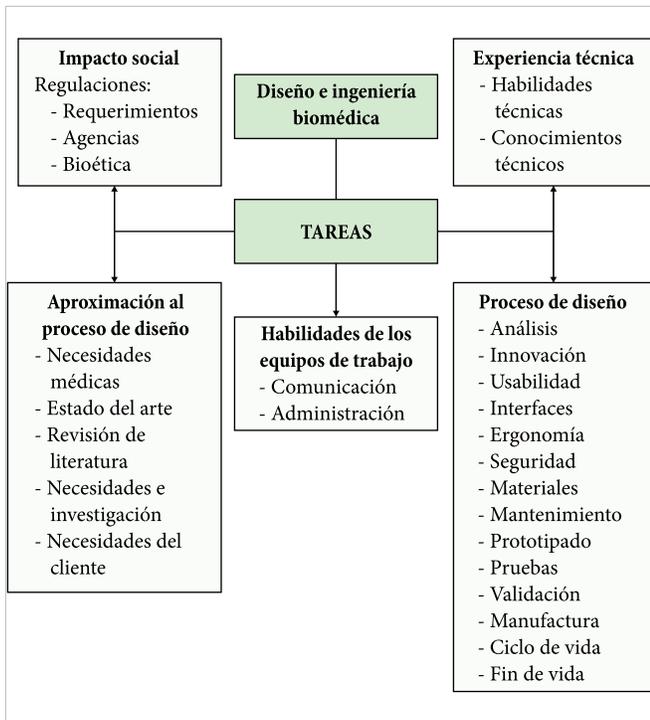


Figura 3. Las tareas a considerar en el diseño e ingeniería biomédica paralelas al proceso de diseño. Basado en los conceptos desarrollados por King et al. [40].

A. USUARIOS

Los productos biomédicos tienen generalmente como usuario final al paciente, sin embargo, este no está a cargo de la operación ni del mantenimiento del dispositivo. Para esto se debe considerar además a los técnicos de instalación encargados de poner en marcha los equipos, a los instructores que facilitan la información sobre su funcionamiento y al personal que los opera. A fin de cuentas, técnicos, capacitadores, personal médico y de mantenimiento, son considerados también como usuarios, ya que son capaces de determinar sobre los procedimientos, la configuración, los esquemas de mantenimiento e incluso incidir sobre el rediseño y mejora de un dispositivo a fin de sacar el máximo provecho en beneficio del paciente.

B. USABILIDAD

La usabilidad se refiere a la facilidad relativa con la que un dispositivo es controlado o manipulado, de preferencia, utilizando la mínima carga cognitiva y considerando la experiencia del usuario. La definición de usabilidad se encuentra en la norma ISO 9241-11 [41], donde se menciona que un dispositivo debe permitir a los usuarios alcanzar objetivos específicos con eficacia, eficiencia y satisfacción dentro de un entorno definido. Se espera que la usabilidad incentive la productividad en la tarea destinada al equipo, aumente la seguridad y reduzca el esfuerzo durante su operación [42].

Regularmente, la seguridad en los dispositivos médicos está relacionada con la usabilidad, ya que se centra en la minimización o reducción de posibles errores durante el uso y el mantenimiento. Además, el dispositivo debe señalar inmediatamente una falla o indicar cuando exista riesgo en su operación. Generalmente en este proceso se utilizan medios simples, como señales visuales o auditivas. Es deseable que los instructivos informen sobre los tipos de errores posibles y presenten instrucciones sobre cómo eliminarlos para lograr poner el sistema en marcha con prontitud. En todos los casos, la documentación al respecto deberá estar a disposición de los operadores y técnicos encargados [40].

C. MANUFACTURA

Uno de los objetivos en el diseño de dispositivos médicos es el de procurar la fabricación continua a través de procesos industrializados, asegurando la calidad,

confiabilidad, rendimiento y disponibilidad, teniendo en cuenta la rentabilidad en términos comerciales. Un objetivo del Diseño para la Fabricación (Design For Manufacturing o DFM) es reducir el número de componentes y partes de un dispositivo; un diseño simple o bien solucionado, facilitará la producción en línea [43]. El DFM permite la reducción de costos, aumenta la calidad, la confiabilidad y favorece el mantenimiento del producto. La fabricación de dispositivos médicos sigue la legislación de salud pública de cada país para asegurar el control de calidad en los procesos de diseño. Un factor esencial es la selección de materiales, ya que incide directamente en su industrialización. Esta se realiza de acuerdo con los siguientes factores: físicos, mecánicos, propiedades térmicas y eléctricas, resistencia química, capacidad de esterilización, durabilidad a largo plazo, vida útil y envejecimiento, entre otros [40], [44].

Metales como el aluminio y el acero, las diferentes aleaciones y los plásticos son comunes en la fabricación de equipos médicos. También los polímeros se utilizan ampliamente. Además de los factores de selección mencionados anteriormente, el uso de polímeros debe considerar las propiedades de los lixiviables y extraíbles, la vida útil y el envejecimiento, la unión y soldadura, los plásticos de grado médico y los suplementos. Es necesario conocer datos sobre toxicidad, irritación de la piel, ojos y superficies mucosas, sensibilización, hemocompatibilidad, genotoxicidad, carcinogenicidad y efectos durante los procesos de industrialización, incluidos los efectos sobre el medio ambiente.

En la investigación de McKeen [44] se especifican muchos de los plásticos que habitualmente se utilizan en los dispositivos médicos. El análisis se centra en polímeros de grado médico, propiedades químicas adecuadas, orientación y aplicaciones de esterilización. De estos, los más utilizados en dispositivos médicos son: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poliéster (SP), ácido poliláctico (PLA y otros plásticos bioabsorbibles), policarbonato (PC), cloruro de polivinilo (PVC), polietersulfona (PES), poliacrilato (acrílico, PMMA), hidrogel/acrilato, polisulfona (PSU), poliéter éter cetona (PEEK), elastómeros termoplásticos, elastómeros, siliconas, poli-p-xilileno/parileno y fluoropolímeros. La información derivada de materiales y procesos es proporcionada por un especialista en fabricación industrial que debe ser consultado en etapas tempranas del desarrollo.

La situación sanitaria actual y la disponibilidad de tecnologías para la impresión 3D ha impulsado la utilización del modelado por deposición fundida (FDM) y el proceso de fabricación aditiva por los siguientes factores [45]: a) capacidad de impresión, b) material accesible, c) precisión, d) volumen de las piezas e) tiempo de fabricación y, f) replicabilidad. El uso de polímeros en la fabricación aditiva tiene también aplicaciones en las áreas médica y biomédica [46]. Los productos manufacturados pueden favorecer los procesos de desinfección y esterilización para su uso en los centros de salud. Uno de los materiales utilizados para imprimir piezas tridimensionales con aplicaciones en áreas médicas es el filamento de ácido poliláctico (PLA), por sus capacidades de esterilización.

En Livingston *et al.* [47] se evaluaron los siguientes métodos de esterilización de materiales: altas temperaturas, radiación ultravioleta, ozono, óxido de etileno, peróxido de hidrógeno, alcohol isopropílico, rayos gamma o electricidad, microondas, sulfato de cobre, azul de metileno, yodo y cloro sódico. En Wady *et al.* [48] se evaluó la eficiencia de la radiación ionizante como proceso de descontaminación, mostrando que el uso de rayos gamma con rangos específicos en varios termoplásticos (incluido el PLA) aumentaba su volumen y causaba daños estructurales. Valente *et al.* [49] muestra que la luz ultravioleta y otros métodos de radiación no influyen en la morfología de la fibra de PLA y su alineación. Por otro lado, los rayos ultravioletas tipo C (200 a 290 nanómetros) tiene un efecto germicida y se ha utilizado ampliamente para esterilizar espacios confinados en hogares, áreas médicas [50] y espacios comerciales e industriales. Investigaciones anteriores muestran además que la radiación ultravioleta puede inactivar los coronavirus, incluidos el SARS-CoV y el MERS-CoV.

D. CICLO DE VIDA

La duración de los dispositivos médicos varía según el entorno, los consumibles, los materiales desechables y los componentes funcionales básicos. Las etapas del ciclo de vida de un dispositivo médico se muestran en la Figura 4 y son las siguientes: diseño, desarrollo, prueba, fabricación, transporte, instalación, prueba en sitio, operación, limpieza, mantenimiento, retiro del servicio y desmantelamiento o eliminación de los componentes, especialmente si están peligrosamente contaminados y la esterilización no es posible.

Es importante analizar cada etapa del ciclo de vida, ya que las decisiones en etapas tempranas inciden en las últimas. Esto sugiere que el flujo entre etapas debe involucrar el número mínimo de variables. Por ejemplo, uno de los principales desafíos es identificar las condiciones peligrosas de acuerdo con la complejidad respecto a diversos elementos del sistema, producto y ambiente [40]. La parte final del ciclo de vida del producto especifica el desmantelamiento y remoción de componentes, sin embargo, en esta etapa es posible obtener beneficios de varias formas: evitar el desperdicio de los componentes, obtener un beneficio económico del producto y reducir el impacto ambiental. La fase *fin de vida útil* (End Of Life, EOL) comienza después del desmontaje y los componentes recuperados pueden reutilizarse, remanufacturarse, reciclarse o desecharse en vertederos especializados [51]. Una selección correcta en los diferentes métodos de análisis tipo EOL, aumenta el valor del producto recuperado.

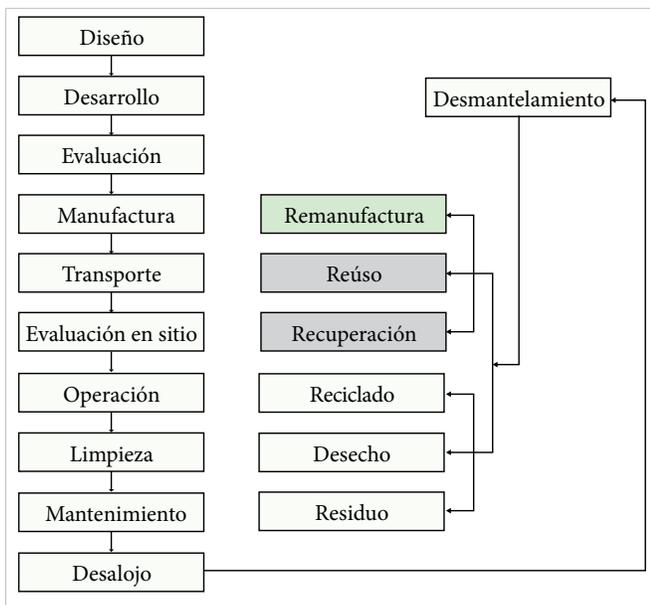


Figura 4. Concepto de ciclo de vida del producto. Diseño propio, basado en [40], [51].

E. PRUEBA

La prueba es un proceso predominante en todas las etapas del diseño y se puede utilizar para evaluar y validar el progreso. Por ejemplo, una vez que se ha desarrollado un concepto avanzado para la operación del sistema se puede construir un modelo físico para evaluar su comportamiento en escenarios definidos. El modelo de prueba se puede crear con detalles realistas para obtener información, tanto sobre interfaces [52] como

antropometría, ergonomía, dimensiones funcionales, elementos psicológicos (señales y alarmas), etiquetado (gráficos y texto), pantallas visuales, controles interactivos, retroalimentación, indicaciones, y seguridad [40]. Este modelo permite, además, el análisis del trabajo mental del operador y la secuencia de uso.

En general, la usabilidad se evalúa a través de las interfaces del dispositivo, que son los elementos utilizados para operarlo o bien los que brindan información al personal médico y a los técnicos. Es común evaluar la interacción y las opiniones del usuario a través de escalas y encuestas tipo Likert, particularmente en aspectos que están condicionados a criterios personales (sensibilidad de alarmas, brillo de pantalla, etc.) [53]. Las pruebas del dispositivo antes de su fabricación final son altamente dependientes de un prototipo. En el caso de la fabricación, existen criterios internacionales sobre evaluación biológica de productos y materiales médicos que se pueden encontrar en la norma ISO 10993 [54]. Las pruebas son esenciales para indicar debilidades, comportamientos, características y modos de falla, independientemente de la técnica industrial seleccionada. Las pruebas se realizan básicamente para brindar al equipo de trabajo datos e información básica sobre compatibilidad de funciones con otros equipos [40], verificación (evaluación del producto basada en estándares establecidos, herramientas para la planificación de inspecciones y control de calidad) y validación (el sistema cumple con los requisitos necesarios de acuerdo con la especificación).

Las pruebas son esenciales, ya que proporcionan suficiente información para lograr mejoras, cuyo objetivo final es la satisfacción del usuario, la salud del paciente, el funcionamiento adecuado y la facilidad de mantenimiento. En King y Fries [40] se ofrece una descripción extensa de pruebas y métodos para el diseño de dispositivos médicos. Las más relevantes son: pruebas de hardware y software, funcionales, robustez, estrés, seguridad, regresión, biocompatibilidad de materiales, pruebas de esterilización y demostración de confiabilidad. Esta última se realiza al final del ciclo de desarrollo del producto.

F. LINEAMIENTOS DE SEGURIDAD PARA ROBOTS USO PERSONAL

La interacción personal con robots de servicio inmersos en entornos sociales es determinante para asignar los parámetros y los alcances de los sistemas robóticos.

La seguridad durante la implementación es un elemento esencial, capaz de definir y orientar las posibilidades de interactividad. Hasta ahora, se ha hablado en mayor medida sobre aspectos relacionados a las posibilidades y conceptos básicos para la manufactura de los sistemas, sin embargo, es importante describir los lineamientos de seguridad apegados a los aspectos técnicos que involucran directamente la intervención de los usuarios. De manera general y de acuerdo al entorno de uso, es necesario identificar los peligros asociados al riesgo laboral cotidiano, independientemente de la presencia de robots, para, posteriormente, atender los principios, normas y estandarizaciones que orienten al diseño del sistema.

Para el presente documento se toman en consideración los principios de la norma ISO 13482: 2014 [55], en donde se especifican los requisitos y pautas para el diseño seguro, las medidas de protección y la información para el uso de robots de cuidado personal. En este caso, se pone especial atención en los robots de servicio móviles y de asistencia. Prácticamente, se busca establecer las medidas para garantizar la seguridad de los usuarios directos que compartan el mismo espacio que los equipos. El ciclo de vida de los productos de diseño y las norma descritas comparten criterios para la configuración general de un robot, esencialmente en las pruebas de uso, inspección, medición y análisis de los resultados, siendo la siguiente secuencia la sugerida para considerar su posible implementación: 1) inspección del producto, 2) ensayos prácticos (ya sea en laboratorio o en sitio), 3) establecimiento de métricas, 4) observación durante la operación, 5) examinación de información técnica (circuitos, software, hardware), 6) evaluación de riesgos basada en tareas y 7) revisión de planos constructivos de diseño y documentación. En términos de implementación funcional, las consideraciones se rigen por los siguientes aspectos.

Energía. Este rubro se relaciona con los riesgos durante el manejo de baterías y conexiones, el suministro energético durante el inicio y arranque del sistema, el potencial electrostático y el diseño de cubiertas para evitar contacto directo con sistemas eléctricos y electrónicos. Se toma en cuenta también la accesibilidad a baterías, componentes, circuitos y demás sistemas que puedan necesitar mantenimiento. Es necesario considerar un espacio adecuado para almacenamiento del robot y recarga de energía. Otro riesgo existente, y que puede afectar el desempeño de los equipos electromecánicos,

es la interferencia electromagnética generada durante la activación y el uso.

Emisiones. Cualquier tipo de emisión de los sistemas que ponga en riesgo la integridad de los usuarios debe ser identificada y controlada dentro de rangos aceptables. En este rubro, el ruido de motores y actuadores puede repercutir en malestares o pérdida de la audición por la exposición en periodos prolongados o puede además detonar otros trastornos. El ruido ultrasónico con ondas sonoras de frecuencias arriba del umbral del oído humano (de más de 20 kHz) también se toma en cuenta.

Movilidad. Los robots que pueden desplazarse en espacios y que tienen componentes articulados, pueden activarse de manera no prevista, impactando estructuras, muebles, objetos ornamentales y en el peor de los casos a los propios usuarios. Por un lado, es necesario un control de velocidad adecuado en su desplazamiento y en el movimiento de sus estructuras (brazos, cabeza, cámaras, otros) y, por otro lado, debe tenerse en cuenta el uso de protecciones fabricadas con materiales y formas que reduzcan el riesgo de lesión. Los elementos de los sistemas deben estar asegurados, contenidos y diseñados para evitar contactos no previstos, así como desprendimientos no deseados.

Configuración formal del robot. El diseño formal del robot debe ser adecuado para mitigar lesiones en el caso de una colisión con los usuarios por una falla técnica. Es importante integrar materiales acojinados o suaves y evitar el uso de geometrías con filos.

Diseño de interfaces. El sistema puede ser operado a través de interfaces gráficas y naturales. En el caso de las primeras, se consideran los controles de mando a través de paneles digitales o de mecanismos como botones y palancas. Además, en el caso de las segundas se utiliza el reconocimiento de voz y el comportamiento emocional o lenguaje corporal. Estos elementos deben ser comprensibles, legibles, fiables y eficaces para conseguir las metas esperadas, de acuerdo a los objetivos del sistema y expectativas del usuario.

Ergonomía de los usuarios. Los aspectos físicos y mentales de los usuarios pueden verse alterados durante la interacción con sistemas robóticos. Para los aspectos físicos (ergonomía física), el diseño debe considerar la antropometría para reducir los riesgos físicos por pos-

turas que afecten el sistema musculoesquelético, derivados de la interacción prolongada o bien durante su transporte, instalación, programación, mantenimiento, reparación e incluso desmantelamiento. Por la parte mental (ergonomía cognitiva), es necesario considerar los criterios culturales, sociales, emocionales, nivel educativo y de edad de los usuarios, para entender así cómo perciben y responden al comportamiento del sistema, p. ej., la velocidad de desplazamiento, la aceleración durante el movimiento de componentes como brazos, cuello, cabeza; la expresión facial o emocional [56], el lenguaje corporal y seguimiento ocular [57].

Se han establecido métricas para evaluar los aspectos negativos que emergen durante la interacción, como la Escala de Actitudes Negativas hacia los Robots (The Negative Attitudes towards Robots Scale, NARS) [58], que es un indicador para evaluar la interacción en corto y largo plazo entre humanos y sistemas. Otro elemento importante respecto a la ergonomía cognitiva es el diseño formal, en donde se han realizado estudios como el propuesto por Masahiro Mori, llamado el Valle Inquietante (Uncanny Valley) [59], sobre el concepto de estética en el diseño y el rechazo hacia robots con forma muy cercana a lo humano, antropomórficos.

Error humano. Existen varios factores de riesgo en donde se involucran fallas derivadas de la interacción con los usuarios, ya sea en la toma de decisiones incorrectas por desconocimiento del sistema, mal mantenimiento, reparación inadecuada o descuido entre otros. Los robots personales deberán diseñarse procurando reducir posibles daños causados en los momentos en que quedan expuestos sus mecanismos, cables, ruedas, engranajes y otros componentes. Es importante integrar botones de emergencia, topes de protección, controles de velocidad y estabilidad, así como desarrollar manuales para usuarios y técnicos de mantenimiento.

El conjunto de aspectos antes mencionados está centrado en los elementos físicos (hardware) dejando de lado aquellos que tienen que ver con las estrategias computacionales, arquitecturas robóticas y de programación (software). Es necesario además tomar en cuenta, los riesgos derivados de la interacción dentro de los espacios a implementar.

Por último, es importante señalar que en las áreas de salud y en otros ambientes, los espacios físicos se fueron adaptando a las medidas sanitarias emergentes, como

respuesta a la pandemia y a sus repercusiones a futuro.

D. EL MUNDO POST COVID

La fase post pandémica se está configurando en el ámbito mundial de diferentes maneras en los esquemas socioculturales. En un posible mundo post COVID se tomarán en cuenta diferentes fenómenos que afectan los comportamientos durante la interacción entre individuos, en gran medida derivados del aislamiento e incertidumbre en la calidad de vida. Esta situación está dando lugar a la expansión masiva de recursos digitales, descentralización de centros de trabajo, de salud y académicos, así como al desarrollo de tecnologías que limiten la interacción física interpersonal [60], [61]. Reflexionando al respecto, es posible considerar una próxima generación de robots centrada en las áreas médicas, resultado de las experiencias actuales, incluyendo, las preocupaciones éticas emergentes, respecto a los límites de la interacción con estos sistemas [62].

La pandemia mostró las prioridades y diferencias entre los recursos destinados a la salud pública en los países desarrollados y en vías de desarrollo. En México se hicieron esfuerzos en el desarrollo de robots de servicio para entrega de alimentos y suministros médicos, pero los recursos fueron en su mayoría asignados a la compra de equipo de protección y de respiradores artificiales, lo que hizo que la inclusión de robots de servicio no fuera un tema de relevancia. Los robots de servicios que se muestran en este documento vislumbran las principales habilidades de los sistemas desarrollados hasta el día de hoy. Es necesario diseñar sistemas con habilidades innovadoras y diferentes a las existentes, como apoyo a la sociedad y en el entorno post COVID inmediato.

III. DISCUSIÓN

Durante la última década, el uso de robots en las áreas de salud ha tenido un avance considerable, sobre todo en trabajos de desinfección, de logística y de comunicación entre pacientes, doctores y familiares. Adicionalmente, los desarrolladores han implementado en los sistemas robóticos, estrategias computacionales como la inteligencia artificial para la detección de casos potenciales de COVID. Algunos de los sistemas robóticos revisados en este documento se diseñaron específicamente para minimizar el impacto por COVID-19, como por ejemplo, los equipos modificados a partir de sistemas preexistentes y que su implementación está en fase ex-

ploratoria. Entre estos se encuentran los sistemas funcionales diseñados para fines de limpieza y desinfección que tienen una alta efectividad en espacios médicos. De acuerdo a la [Tabla 1](#), los sistemas activos no involucran la interacción directa con el usuario, salvo con el operador que activa el sistema para después desalojar el área que será descontaminada y quién además está a cargo en todo momento de su desempeño. Por tanto, son los sistemas robóticos que interactúan de manera directa y constante con usuarios los que se encuentran aún en fase experimental. Se puede entender así que realizar estudios en interacción humano-robot (Human Robot Interaction, HRI) es de vital importancia.

En la actualidad y ante la situación global de emergencia sanitaria aún prevaleciente, el desarrollo de este tipo de sistemas se enfrenta a distintos problemas y su solución va más allá del contexto inmediato de aplicación. De manera general, es posible afirmar que el principal obstáculo radica en la falta de investigación aplicada y el rezago existente en la tecnología local. En el ámbito global, se impulsó el desarrollo durante la fase de emergencia, sin embargo, las prioridades eran de índole totalmente médico. Aunado a esto, la integración de robots en entornos sociales es, como se mencionó, altamente compleja, los estudios en HRI son insuficientes en el entorno inmediato y aun en países avanzados estos análisis no son un tema dominante en la investigación.

Otro problema al que se enfrenta esta tecnología es la demanda de recursos tecnológicos, ya que el acceso a componentes asequibles y de alto rendimiento es insuficiente. Actualmente, el comportamiento de los robots (habilidades), depende en mayor o menor medida del acceso a internet, sin embargo, la infraestructura médica es aún deficiente. En este sentido, es necesario considerar una reestructuración de las instalaciones para alojar sistemas robóticos utilitarios, con un desempeño eficiente y bajo el control de especialistas con formación en áreas médicas, ingenieriles y de diseño. Aunado a esto, la pertinencia de los sistemas en el entorno es un tema que requiere mayor profundización.

Lamentablemente, de acuerdo a los datos mostrados en la [Tabla 1](#), los desarrollos se encuentran en un estado medio de madurez. Este nivel tecnológico, respecto al diseño de artefactos y sistemas, puede determinarse tomando en cuenta los indicadores proporcionados por

la NASA [\[65\]](#), nueve niveles que abarcan desde los principios básicos de funcionamiento hasta los ensayos de prueba en el entorno final de implementación, en este caso el contexto médico.

Las estrategias actuales de adaptación en los espacios de salud requieren cambios que involucran a médicos, pacientes, administradores y a la industria [\[63\]](#), [\[64\]](#). Estas adaptaciones se enlistan a continuación y es necesario considerarlas durante el diseño de robots de servicio:

- Telemedicina, asistencia sanitaria, telesalud, asesoramiento en línea, eHealth.
- Cuidados en el hogar.
- Logística, planificación, coordinación y comunicación.
- Protección contra virus y saneamiento.
- Evaluación inmunológica continua.
- Rediseño y reorganización laboral.
- Apoyo psicológico.
- Educación médica continua.

La solución a los retos planteados recae principalmente en el entorno académico, abriendo espacios a la discusión en el uso de tales sistemas y generando conocimiento con fines de diseño, aplicación y actualización continua. La coordinación de grupos para el desarrollo de iniciativas académicas es un factor esencial en la capacitación de especialistas y técnicos. Un ejemplo de esto son los equipos participantes en las diversas competencias internacionales, como RoboCup en su liga de robot de servicio para el hogar (Robocup@home [\[66\]](#), [\[67\]](#)) y los torneos locales, como el mexicano de robótica, de la Federación Mexicana de Robótica [\[68\]](#). Así, se impulsa la integración de tareas y de escenarios representativos en áreas de la salud con el fin de trasladar los desarrollos a los entornos reales y analizar la interacción de los sistemas con los usuarios.

El estudio e implementación de interfaces gráficas y naturales son básicas para crear canales de comunicación. De acuerdo al ciclo de vida del producto, es necesario evaluar los desarrollos en laboratorio y en el entorno final. Por tal motivo, es indispensable generar instrumentos de experimentación con tecnología de prototipado rápido y manufactura digital basada en procesos aditivos y de control numérico (CAD/CAM/CNC) asequibles actualmente en el entorno latinoamericano.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se analizaron las características generales de diversos robots, y se exploraron algunos sistemas robóticos implementados en las áreas médicas en respuesta a la pandemia por COVID-19. Esta revisión sirve de base para argumentar sobre la implementación de esta tecnología emergente, apoyándose en los lineamientos del diseño de productos biomédicos y centrándose principalmente en criterios generales, como usuarios, usabilidad, manufactura, ciclo de vida del producto y lineamientos de seguridad para robots de uso personal. A modo prospectivo, se tomaron en cuenta los fenómenos sociales y tecnológicos que se apuntalan en un mundo posterior a la pandemia prevaleciente, con el fin de establecer las bases para la generación de sistemas capaces, eficientes y adecuados a los entornos de salud, considerando las nuevas formas de interacción.

La integración de sistemas robóticos en entornos cotidianos es sin duda un tema complejo. Resulta idóneo realizar análisis multidisciplinarios en donde tengan participación activa diferentes áreas de la ingeniería, como la mecánica, la electrónica y la computacional, entre otras, así como áreas de las humanidades y de la salud, en especial la psicología, la ergonomía, la antropología, la ética y, por último, el diseño de producto y el industrial. Dadas las condiciones sanitarias en la actualidad, es necesario establecer o reforzar los conocimientos útiles para el uso de robots a favor de la sociedad, prestando especial atención en los entornos médicos y considerando a los sistemas de esta índole como artefactos con cualidades similares a los equipos biomédicos. Es imperativo adecuar las instalaciones, creando la infraestructura necesaria para recibir robots en los espacios comunes, preparando los sistemas para monitorear el desempeño, colocando señalización de las áreas destinadas a la presencia de robots y designando espacios para el mantenimiento y el resguardo de los equipos.

El agente patógeno que causa la enfermedad por COVID-19 se ha establecido de manera permanente y, para mitigar su impacto, el desarrollo tecnológico actual está centrado en la creación de vacunas. A futuro, es necesario considerar otro tipo de desarrollos que eviten la propagación de este y de otros posibles virus. La robótica destaca por sus múltiples aportaciones en entornos sociales y esta se apoya a su vez en otras tecnologías, como el diseño de interfaces, la internet de las

cosas, la inteligencia artificial, la realidad virtual, la manufactura digital y el almacenamiento en la nube, entre otras. El desarrollo tecnológico local es probablemente el factor de mayor trascendencia ante los retos planteados, ya que la dependencia tecnológica es alta; por lo tanto, se debe impulsar el desarrollo considerando un modelo de innovación de triple hélice: academia, industria y gobierno.

Para finalizar, el desarrollo tecnológico emergente deberá adecuarse en su totalidad al uso de tecnologías de la industria 4.0, solucionando problemas sociales inmediatos, sin olvidar que las estrategias de integración dependen únicamente de personas capaces de entender las necesidades, quienes decidirán si su uso es pertinente o adecuado al contexto y si es acorde a las expectativas de la sociedad 5.0.

REFERENCIAS

- [1] J. Bharatharaj, L. Huang, C. Krägeloh, M. R. Elara y A. Al-Jumaily, "Social engagement of children with autism spectrum disorder in interaction with a parrot-inspired therapeutic robot", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 133, pp. 368-376, 2018, doi: [10.1016/j.procs.2018.07.045](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.045).
- [2] M. Hii, P. Courtney y P. Royall, "An Evaluation of the Delivery of Medicines Using Drones", *Drones*, vol. 3, no. 3, jun. 2019, doi: [10.3390/drones3030052](https://doi.org/10.3390/drones3030052).
- [3] J. Bacik, F. Durovsky, M. Biros, K. Kyslan, D. Perdukova y S. Padmanaban, "Pathfinder-Development of Automated Guided Vehicle for Hospital Logistics", *IEEE Access*, vol. 5, pp. 26892-26900, 2017, doi: [10.1109/ACCESS.2017.2767899](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2767899).
- [4] C. G. Rodriguez-Gonzalez, A. Herranz-Alonso, V. Escudero-Vilaplana, M. A. Ais-Larisgoitia, I. Iglesias-Peinado y M. Sanjurjo-Saez, "Robotic dispensing improves patient safety, inventory management, and staff satisfaction in an outpatient hospital pharmacy", *J Eval Clin Pract*, vol. 25, no. 1, pp. 28-35, feb. 2019, doi: [10.1111/jep.13014](https://doi.org/10.1111/jep.13014).
- [5] T. Bányai, I. Maral, B. Illés, Á. Bányai y P. Tamás, "Optimization of Operation Strategy for Collection Systems of Biohazard Wastes in Hospitals Based on Autonomous Robots: A Heuristic Approach", *AJRCoS*, pp. 33-43, jun. 2020, doi: [10.9734/ajrcos/2020/v5i430142](https://doi.org/10.9734/ajrcos/2020/v5i430142).

- [6] L. A. Pineda, A. Rodríguez, G. Fuentes, C. Rascon y I. V. Meza, "Concept and Functional Structure of a Service Robot", *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 12, no. 2, feb. 2015, doi: 10.5772/60026.
- [7] J. Savage-Carmona, L. E. Sucar-Sucrar, L. A. Pineda-Cortés, M. Matamoros, D. A. Rosenblueth y M. Negrete, "Robots de Servicio", en *Robótica de Servicio*, E. Sucar y Y. Hernández, eds. México: Academia Mexicana de Computación, A.C., 2017.
- [8] A. Ghaffari, I. McGill y A. Ardakani, "Trends in COVID-19 diagnostic test development", *BioProcess Int.*, vol. 18, no. 6, pp. 34-45, 2020.
- [9] S. Manzoor et al., "Ontology-Based Knowledge Representation in Robotic Systems: A Survey Oriented toward Applications", *Applied Sciences*, vol. 11, no. 10, may. 2021, doi: 10.3390/app11104324.
- [10] K. Severinson-Eklundh, A. Green y H. Hüttenrauch, "Social and collaborative aspects of interaction with a service robot", *Rob Auton Syst*, vol. 42, no. 3-4, pp. 223-234, mar. 2003, doi: 10.1016/S0921-8890(02)00377-9.
- [11] G. Brewka, "Artificial intelligence—a modern approach by Stuart Russell and Peter Norvig, Prentice Hall. Series in Artificial Intelligence, Englewood Cliffs, NJ", *Knowl. Eng. Rev.*, vol. 11, no. 1, pp. 78-79, mar. 1996, doi: 10.1017/S0269888900007724.
- [12] I. H. Suh, G. H. Lim, W. Hwang, H. Suh, J. -H. Choi y Y. -T. Park, "Ontology-based multi-layered robot knowledge framework (OMRKF) for robot intelligence", *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, pp. 429-436, doi: 10.1109/IROS.2007.4399082.
- [13] Z. Li, P. Moran, Q. Dong, R. J. Shaw y K. Hauser, "Development of a tele-nursing mobile manipulator for remote care-giving in quarantine areas", *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2017, pp. 3581-3586, doi: 10.1109/ICRA.2017.7989411.
- [14] "temi - The Personal Robot". Robotemi.com. <https://www.robotemi.com/> (consultado sept. 2, 2021).
- [15] G. Yang et al., "Keep Healthcare Workers Safe: Application of Teleoperated Robot in Isolation Ward for COVID-19 Prevention and Control", *Chin. J. Mech. Eng.*, vol. 33, no. 1, dic. 2020, doi: 10.1186/s10033-020-00464-0.
- [16] "Conoce a RoomieBot". Roomiebot.io. <http://www.roomiebot.io/roomiebot/> (consultado sept. 23, 2021).
- [17] A. Luévano, "RoomieBot COVID-19". Roomie-it.org. <https://roomie-it.org/robotics/book-illustration-series/> (consultado sept. 6, 2021).
- [18] H.-W. Huang et al., "Agile mobile robotic platform for contactless vital signs monitoring", preprint, 2020. doi: 10.36227/techriv.12811982.v1.
- [19] "Anti Epidemic Solution", UBTECH. <https://starwars.ubtrobot.com/products/anti-epidemic-solution?ls=en> (consultado sept. 2, 2021).
- [20] "Misty II: A Partner in COVID-19 Safety and Wellness", MISTY ROBOTICS. <https://www.mistyrobotics.com/use-cases/robot-for-covid-19-coronavirus-safety-wellness/> (consultado sept. 2, 2021).
- [21] "Hospital 4.0: KUKA lab robots sort up to 3,000 blood samples per day". KUKA. https://www.kuka.com/en-de/industries/solutions-database/2020/03/hospital-4-0_kuka-lab-robots-sort-blood-samples (consultado sept. 2, 2021).
- [22] "ABB robots accelerate COVID-19 vaccine development in Thailand". ABB. <https://new.abb.com/news/detail/72021/abb-robots-accelerate-covid-19-vaccine-development-in-thailand> (consultado sept. 2, 2021).
- [23] "The Cleveland Clinic's Underground Robots Assist With Medical Waste". Ideastream Public Media. <https://www.ideastream.org/news/the-cleveland-clinics-underground-robots-assist-with-medical-waste> (consultado sept. 2, 2021).
- [24] "Lifeline Robotics", Lifeline Robotics. <https://www.lifelineroobotics.com> (consultado sept. 2, 2021).
- [25] C. Jinadatha, R. Quezada, T. W. Huber, J. B. Williams, J. E. Zeber y L. A. Copeland, "Evaluation of a pulsed-xenon ultraviolet room disinfection device for impact on contamination levels of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*", *BMC Infect Dis*, vol. 14, no. 1, 2014, doi: 10.1186/1471-2334-14-187.

- [26] “UVD - Case”. UVO ROBOTS. <http://uvd.blue-ocean-robotics.com/italy> (consultado sept. 23, 2021).
- [27] “Akara Robotics Turns TurtleBot Into Autonomous UV Disinfecting Robot”. IEEE Spectrum. <https://spectrum.ieee.org/akara-robotics-turtlebot-autonomous-uv-disinfecting-robot> (consultado sept. 2, 2021).
- [28] “CSAIL robot disinfects Greater Boston Food Bank”. MIT News On Campus and Around the World. <https://news.mit.edu/2020/csail-robot-disinfects-greater-boston-food-bank-covid-19-0629> (consultado sept. 23, 2021).
- [29] “Geek+ launches two new disinfection robots”. Geek+. <https://blog.geekplus.com/company/news-center/geek-launches-two-new-disinfection-robots> (consultado sept. 2, 2021).
- [30] “Aobo Information Technology Co., Ltd.-Professional production of service robots”. AoBoTechnology. <http://www.aoborobot.com/en/robot-fig-en/penwubanxiaodubenben-fig.html> (consultado sept. 2, 2021).
- [31] “Spray disinfection robot_Shenzhen all intelligent robot technology Co., Ltd”. AItech.com. <http://www.ai-aitech.com/Sterilization-robot> (consultado sept. 2, 2021).
- [32] “Keenon Disinfection Robot M2-Keenon Robotics”. KEENON. <https://www.keenonrobot.com/EN/Product/pro3.html> (consultado sept. 2, 2021).
- [33] T. Fong, I. Nourbakhsh y K. Dautenhahn, “A survey of socially interactive robots”, *Rob Auton Syst*, vol. 42, no. 3-4, pp. 143-166, mar. 2003, doi: 10.1016/S0921-8890(02)00372-X.
- [34] A. Henschel, R. Hortensius y E. S. Cross, “Social Cognition in the Age of Human-Robot Interaction”, *Trends Neurosci.*, vol. 43, no. 6, pp. 373-384, jun. 2020, doi: 10.1016/j.tins.2020.03.013.
- [35] D. Feil-Seifer, K. S. Haring, S. Rossi, A. R. Wagner y T. Williams, “Where to Next? The Impact of COVID-19 on Human-Robot Interaction Research”, *J. Hum.-Robot Interact.*, vol. 10, no. 1, pp. 1-7, feb. 2021, doi: 10.1145/3405450.
- [36] “COVID-19 Archives”, PAL Robotics Blog. <https://blog.pal-robotics.com/tag/covid-19/> (consultado sept. 23, 2021).
- [37] palrobot, “ARI - PAL Robotics: Leading service robots”, PAL Robotics. <https://pal-robotics.com/robots/ari/> (consultado sept. 23, 2021).
- [38] “UN sends five robots to Rwanda to detect coronavirus”, Robotics & Automation News, jun. 12, 2020. <https://roboticsandautomationnews.com/2020/06/12/un-sends-five-robots-to-rwanda-to-detect-coronavirus/33036/> (consultado sept. 2, 2021).
- [39] “Moxi”, Diligent Robotics. <https://www.diligentrobots.com/moxi> (consultado sept. 2, 2021).
- [40] P. H. King R. C. Fries y A. T. Johnson, *Design of Biomedical Devices and Systems*, 4.^a ed. Boca Ratón: Taylor & Francis, 2018, doi: 10.1201/9780429434792.
- [41] ISO, “ISO 9241-11:2018”, ISO.org. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/35/63500.html> (consultado sept. 2, 2021).
- [42] D. van Eijk, J. van Kuijk, F. Hoolhorst, C. Kim, C. Harkema y S. Dorrestijn, “Design for Usability; practice-oriented research for user-centered product design”, *Work*, vol. 41, no. supl. 1, pp. 1008-1015, 2012, doi: 10.3233/WOR-2012-1010-1008.
- [43] M. Orshansky, S. R. Nassif y D. S. Boning, *Design for manufacturability and statistical design: a comprehensive approach*. Nueva York - Londres: Springer, 2007.
- [44] L. W. McKeen, “Plastics Used in Medical Devices”, en *Handbook of Polymer Applications in Medicine and Medical Devices*, K. Modjarrad y S. Ebnesajjad, eds., Elsevier, 2014, pp. 21-53, doi: 10.1016/B978-0-323-22805-3.00003-7.
- [45] C. S. Frandsen, M. M. Nielsen, A. Chaudhuri, J. Jayaram y K. Govindan, “In search for classification and selection of spare parts suitable for additive manufacturing: a literature review”, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 4, pp. 970-996, feb. 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1605226.
- [46] C. M. González-Henríquez, M. A. Sarabia-Vallejos y J. Rodríguez-Hernández, “Polymers for additive manu-

- facturing and 4D-printing: Materials, methodologies, and biomedical applications”, *Prog. Polym. Sci.*, vol. 94, pp. 57-116, jul. 2019, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2019.03.001.
- [47] E. Livingston, A. Desai y M. Berkwits, “Sourcing Personal Protective Equipment During the COVID-19 Pandemic”, *JAMA*, vol. 323, no. 19, 2020, doi: 10.1001/jama.2020.5317.
- [48] P. Wady et al., “Effect of ionising radiation on the mechanical and structural properties of 3D printed plastics”, *Addit Manuf*, vol. 31, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.100907.
- [49] T. A. M. Valente, D. M. Silva, P. S. Gomes, M. H. Fernandes, J. D. Santos y V. Sencadas, “Effect of Sterilization Methods on Electrospun Poly(lactic acid) (PLA) Fiber Alignment for Biomedical Applications”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, no. 5, pp. 3241-3249, feb. 2016, doi: 10.1021/acsami.5b10869.
- [50] J. L. Cadnum, D. Li, S. N. Redmond, A. R. John, B. Pearlmutter y C. Donskey, “Effectiveness of Ultraviolet-C Light and a High-Level Disinfection Cabinet for Decontamination of N95 Respirators”, *Pathog. Immun.*, vol. 5, no. 1, 2020, doi: 10.20411/pai.v5i1.372.
- [51] J. Ma, G. E. O. Kremer y C. D. Ray, “A comprehensive end-of-life strategy decision making approach to handle uncertainty in the product design stage”, *Res Eng Design*, vol. 29, no. 3, pp. 469-487, jul. 2018, doi: 10.1007/s00163-017-0277-0.
- [52] M. Wächter, H. Hoffmann y A. C. Bullinger, “Towards an Engineering Process to Design Usable Tangible Human-Machine Interfaces”, en *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*, vol. 825, 2019, pp. 136-147, doi: 10.1007/978-3-319-96068-5_15.
- [53] M. E. Wiklund y S. B. Wilcox, *Designing usability into medical products*. Boca Ratón: CRC Press, 2005.
- [54] ISO, “ISO 10993-1:2018”, ISO.org. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/89/68936.html> (consultado sept. 23, 2021).
- [55] ISO, “ISO 13482:2014”, ISO.org. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/05/38/53820.html> (consultado sept. 2, 2021).
- [56] M. E. Reyes, I. V. Meza y L. A. Pineda, “Robotics facial expression of anger in collaborative human-robot interaction”, *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 16, no. 1, 2019, doi: 10.1177/1729881418817972.
- [57] M. A. Goodrich y A. C. Schultz, “Human-Robot Interaction: A Survey”, *Found. Trends Hum.-Comput. Interact.*, vol. 1, no. 3, pp. 203-275, 2007, doi: 10.1561/1100000005.
- [58] T. Nomura, T. Suzuki, T. Kanda y K. Kato, “Measurement of negative attitudes toward robots”, *Interact. Stud.*, vol. 7, no. 3, pp. 437-454, nov. 2006, doi: 10.1075/is.7.3.14nom.
- [59] M. Mori, K. MacDorman y N. Kageki, “The Uncanny Valley [From the Field]”, en *IEEE Robot. Automat. Mag.*, vol. 19, no. 2, pp. 98-100, jun. 2012, doi: 10.1109/MRA.2012.2192811.
- [60] R. Florida, A. Rodríguez-Pose y M. Storper, “Cities in a post-COVID world”, *Urban Stud*, jun. 2021, doi: 10.1177/00420980211018072.
- [61] S. Sharfuddin, “The world after Covid-19”, *The Round Table*, vol. 109, no. 3, pp. 247-257, may. 2020, doi: 10.1080/00358533.2020.1760498.
- [62] M. S. Kaiser, S. Al Mamun, M. Mahmud y M. H. Tania, “Healthcare Robots to Combat COVID-19”, en *COVID-19: Prediction, Decision-Making, and its Impacts*, K. C. Santosh y A. Joshi, eds., Singapur: Springer Singapur, 2021, vol. 60, pp. 83-97, doi: 10.1007/978-981-15-9682-7_10.
- [63] J. M. Abadal, J. Gonzalez-Nieto, F. Lopez-Zarraga, M. A. de Gregorio, P. M. Kitrou y S. Mendez, “Future scenarios and opportunities for interventional radiology in the post COVID-19 era”, *Diagn Interv Radiol*, vol. 27, no. 2, pp. 263-268, mar. 2021, doi: 10.5152/dir.2020.20494.
- [64] G. N. Moawad, S. Rahman, M. A. Martino y J. S. Klebanoff, “Robotic surgery during the COVID pandemic: why now and why for the future”, *J Robotic Surg*, vol. 14, no. 6, pp. 917-920, dic. 2020, doi: 10.1007/s11701-020-01120-4.
- [65] I. Tzinis, “Technology Readiness Level”. NASA.gov. <http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineer->

- [ing/technology/technology_readiness_level](#) (consultado sept. 27, 2021).
- [66] “RoboCup”. RoboCup.org. <https://www.robocup.org/> (consultado sept. 27, 2021).
- [67] “RoboCup@Home. Where the best domestic service robots test themselves”. <https://athome.robocup.org/> (consultado sept. 27, 2021).
- [68] “Federación Mexicana de Robótica”. <https://femexrobotica.org/> (consultado sept. 27, 2021).