

21 de mayo de 2009



Una hoja de ruta para la robótica estadounidense

# De Internet a la robótica

Organizado por

---

Instituto de Tecnología de Georgia

Universidad del Sur de California

Universidad Johns Hopkins

Universidad de Pennsylvania

Universidad de California, Berkeley

Instituto Politécnico Rensselaer

Universidad de Massachusetts, Amherst

Universidad de Utah

Universidad de Carnegie mellon

Colaboración tecnológica

Patrocinado por

---





# Tabla de contenido

## Descripción general

La robótica como facilitador económico clave	1
Resultados de la hoja de ruta: resumen de los principales hallazgos	2
Conceptos específicos del mercado	3
Más información	5

## Capítulo 1

### Prioridades de investigación en robótica y automatización para la industria manufacturera de EE. UU. 7

Resumen ejecutivo	7
1. Introducción	8
2. Importancia estratégica de la robótica en la fabricación	9
2.1. Impulso económico	9
2.2. Áreas de crecimiento	10
2.3. Una visión para la fabricación	11
3. Hoja de ruta de investigación	12
3.1. Proceso	12
3.2. Viñetas de robótica y fabricación	12
3.3. Capacidades críticas para la fabricación	13
4. Investigación y desarrollo: direcciones prometedoras	17
4.1. Aprendizaje y Adaptación	17
4.2. Modelado, Análisis, Simulación y Control	18
4.3. Métodos formales	18
4.4. Control y Planificación	18
4.5. Percepción	19
4.6. Mecanismos novedosos y actuadores de alto rendimiento	19
4.7. Interacción humano-robot	19
4.8. Arquitectura y representaciones	19
5. Referencias	20
6. Colaboradores	21

Capítulo 2

## Una hoja de ruta de investigación para la robótica médica y sanitaria

23

Resumen ejecutivo	23	
Motivación y alcance	23	
Participantes	24	
Hallazgos del taller	24	
1. Introducción	24	
1.1. Definición del campo/dominio	24	
1.2. Impulsores sociales	25	
2. Hallazgos estratégicos	27	
2.1. Robótica Quirúrgica e Intervencionista	27	
2.2. Reemplazo robótico de función disminuida/pérdida	28	28
Recuperación y rehabilitación asistidas por robots	28	
2.4. 29 Terapia conductual		
2.5. Atención personalizada a poblaciones con necesidades especiales	30	30
2.6. Bienestar/Promoción de la Salud	31	
3. Desafíos y capacidades clave	31	
3.1. Escenarios ejemplares motivadores	31	31
3.2. Hoja de ruta de capacidades	33	
3.3. Problemas de implementación	42	
4. Investigación/Tecnologías Básicas	43	
4.1. Arquitectura y representaciones	43	
4.2. Métodos formales	44	
4.3. Control y Planificación	44	44
Percepción	44	
4.5. Sensores robustos y de alta fidelidad	45	45
4.6. Mecanismos novedosos y actuadores de alto rendimiento	45	
4.7. Aprendizaje y Adaptación	46	46
4.8. Interacción física humano-robot	46	
4.9. Robots socialmente interactivos	47	
4.10. Modelado, simulación y análisis	47	
5. Colaboradores	49	

Capítulo 3

## Una hoja de ruta para la robótica de servicios

1. Introducción	51	
2. Hallazgos estratégicos	52	
2.1. Principales mercados e impulsores	53	53
2.2. Oportunidades a corto plazo y Factores que afectan la comercialización	54	54

2.3. Retos científicos y técnicos	55
3. Desafíos/capacidades clave	60
3.1. Escenarios motivadores	60
3.2. Hoja de ruta de capacidades	63
4. Investigación y Tecnologías Básicas	68
4.1. Arquitectura y Representaciones	68
4.2. Control y Planificación	68
4.3. Percepción	69
4.4. Sensores robustos y de alta fidelidad	69
4.5. Mecanismos novedosos y actuadores de alto rendimiento	69
4.6. Aprendizaje y Adaptación	70
4.7. Interacción física humano-robot	70
4.8. Robots socialmente interactivos	70
5. Colaboradores	71
<b>Capítulo 4</b>	
Robótica: tecnologías y tendencias emergentes	73
1. Introducción	73
2. Hallazgos Estratégicos	74
2.1. Sistemas de actuación	74
2.2. Energía y sistemas de potencia	74
2.3. Tecnología de fabricación y materiales	75
2.4. Micro y Nanotecnología	75
2.5. Interfaces hombre-robot	76
2.6. Comunicaciones y Redes	76
2.7. Planificación y Control	77
2.8. Robustez y fiabilidad	77
2.9. Percepción y aprendizaje automático	78
3. Desafíos/capacidades clave	78
3.1. Escenarios motivadores/ejemplares	78
3.2. Hoja de ruta de capacidades	80
4. Investigación/Tecnologías	83
4.1. Sistemas de actuación	83
4.2. Energía y sistemas de potencia	83
4.3. Tecnología de fabricación y materiales	84
4.4. Planificación y Control	85
5. Colaboradores	86



## Descripción general

# La robótica como facilitador económico clave

Durante los últimos 50 años, los robots se han utilizado principalmente para proporcionar mayor precisión y rendimiento para tareas particulares y repetitivas, como soldadura, pintura y mecanizado, en entornos de fabricación peligrosos y de gran volumen. Automatizar funciones tan sucias, aburridas y peligrosas ha implicado principalmente implementar soluciones personalizadas con un valor relativamente específico a corto plazo. Aunque como resultado se ha desarrollado una importante industria de robótica "industrial", las aplicaciones para tales soluciones robóticas de primera generación han demostrado ser relativamente limitadas y en gran medida restringidas a entornos interiores estáticos, debido a limitaciones en la tecnología habilitadora.

Sin embargo, en los últimos cinco años, enormes avances en la tecnología robótica han permitido una nueva generación de aplicaciones en campos tan diversos como la fabricación ágil, la logística, la medicina, la atención sanitaria y otros segmentos del mercado comercial y de consumo. Además, es cada vez más evidente que estos productos iniciales de próxima generación son un presagio de numerosos mercados globales de tecnología robótica a gran escala que probablemente se desarrollarán en la próxima década. Debido al inexorable envejecimiento de nuestra población y al surgimiento de una nueva generación, la industria de la "robotecnología" eventualmente afectará las vidas de todos los estadounidenses y tendrá un enorme impacto económico, social y político en el futuro de nuestra nación.

Desafortunadamente, Estados Unidos va a la zaga de otros países en reconocer la importancia de la tecnología robótica. Mientras que la Unión Europea, Japón, Corea y el resto del mundo han realizado importantes inversiones en I+D en tecnología robótica, la inversión estadounidense, fuera de los sistemas no tripulados con fines de defensa, sigue siendo prácticamente inexistente. A menos que esta situación pueda abordarse en el futuro cercano, Estados Unidos corre el riesgo de abdicar de nuestra capacidad de competir globalmente en estos mercados emergentes y poner a la nación en riesgo de tener que depender del resto del mundo para proporcionar una tecnología crítica que nuestra población será cada vez más dependiente. Robotech representa claramente una de las pocas tecnologías capaces en el corto plazo de construir nuevas empresas y crear nuevos empleos y, en el largo plazo, de abordar un tema de importancia nacional crítica.

Para articular la necesidad de que Estados Unidos establezca una iniciativa nacional de robótica, más de 140 personas de empresas, laboratorios y universidades de todo el país unieron fuerzas para producir un informe definitivo que (1) identifica el impacto futuro de la tecnología robótica en la economía, sociales y de seguridad de la nación, (2) describe los diversos desafíos científicos y tecnológicos, y (3) documenta una hoja de ruta tecnológica para abordar esos desafíos. Este esfuerzo fue patrocinado por el Computing Community Consortium (CCC) y dirigido por 12 investigadores de talla mundial de las principales instituciones académicas de robótica de los Estados Unidos. El proyecto incluyó tres talleres orientados a aplicaciones que se centraron en los esfuerzos en los mercados de fabricación, atención sanitaria/médica y robótica de servicios; más uno sobre investigación de cielo azul que abordó una serie de tecnologías habilitadoras que deben ser el foco de una investigación sostenida y el desarrollo de aplicaciones para que Estados Unidos siga siendo líder en tecnología robótica y desarrollo comercial.

Lo que sigue es un resumen de los principales hallazgos de todos los talleres, las oportunidades y desafíos específicos de cada uno de los tres mercados objetivo y las acciones recomendadas que deben tomarse si Estados Unidos quiere seguir siendo globalmente competitivo en tecnología robótica. También están disponibles informes detallados de cada uno de los cuatro talleres.

## Resultados de la hoja de ruta: resumen de los principales hallazgos

- La tecnología robótica tiene el potencial de transformar el futuro del país y es probable que lo haga. En las próximas décadas se volverá tan omnipresente como lo es hoy la tecnología informática.

El factor clave que afecta el futuro a largo plazo de la tecnología robótica es el envejecimiento de nuestra población tanto en términos de su potencial para abordar la brecha creada por una fuerza laboral que envejece como de la oportunidad de satisfacer las necesidades de atención médica de esta población que envejece.

Liderados por Japón, Corea y la Unión Europea, el resto del mundo ha reconocido la necesidad irrefutable de avanzar en la tecnología robótica y hemos asumido compromisos de inversión en investigación por un total de más de mil millones de dólares; La inversión estadounidense en tecnología robótica, fuera de los sistemas no tripulados con fines de defensa, sigue siendo prácticamente inexistente.

- Sin embargo, la tecnología robótica ha avanzado lo suficiente como para permitir un número cada vez mayor de soluciones y aplicaciones de "aumento humano" en una amplia gama de áreas que son pragmáticas, asequibles y brindan valor real.
- Como tal, la tecnología robótica ofrece una rara oportunidad de invertir en un área que proporciona lo más real. Potencial para crear nuevos empleos, aumentar la productividad, aumentar la seguridad de los trabajadores en el corto plazo y abordar las cuestiones fundamentales asociadas con el crecimiento económico en una era de envejecimiento significativo de la población en general y garantizar servicios para dicha población.
- Cada taller identificó aplicaciones de la tecnología robótica a corto y largo plazo y estableció metas a 5, 10 y 15 años para las capacidades críticas requeridas para habilitar dichas aplicaciones, e identificaron las tecnologías subyacentes necesarias para habilitar estas capacidades críticas.

Si bien ciertas capacidades críticas y tecnologías subyacentes eran específicas de cada dominio,

El esfuerzo de síntesis identificó ciertas capacidades críticas que eran comunes en todos los ámbitos, incluida la percepción, planificación y navegación 3D sólidas, la manipulación diestra similar a la humana, la interacción intuitiva entre humanos y robots y el comportamiento seguro de los robots.

# Conceptos específicos del mercado

## Fabricación

El sector manufacturero representa el 14% del PIB de Estados Unidos y alrededor del 11% del empleo total.

Hasta el 75% de las exportaciones netas de Estados Unidos están relacionadas con la manufactura. Este sector representa un área de gran importancia para la salud económica general del país.

En la fabricación, gran parte del progreso y los procesos que involucran la tecnología robótica históricamente han sido definidos por el sector automotriz y han estado impulsados en gran medida por el precio y la necesidad de automatizar tareas específicas, particularmente en la fabricación de grandes volúmenes. Sin embargo, la nueva economía está mucho menos centrada en la fabricación en masa y más en producir productos personalizados.

La empresa modelo ya no es una gran entidad como GM, Chrysler o Ford, sino pequeñas y medianas empresas como las que se encuentran, por ejemplo, en Fox Valley o en los suburbios de Chicago. La necesidad en una economía así depende mucho más de mayores grados de adaptación, facilidad de uso y otros factores que permiten pequeñas tiradas de productos hechos a medida. Aunque Estados Unidos ha seguido liderando el mundo durante la última década en el aumento de la productividad manufacturera, cada vez nos resulta más difícil competir con empresas de países con salarios bajos que producen los mismos productos utilizando las mismas herramientas y procesos.

Sin embargo, mediante el desarrollo y la adopción de tecnología robótica de próxima generación y el avance de una fuerza laboral más capacitada, es posible que Estados Unidos continúe liderando el mundo en productividad manufacturera, especialmente para las pequeñas y medianas empresas. Hacerlo permitirá que la nación mantenga una base manufacturera fuerte y competitiva a nivel mundial, garantizará nuestro crecimiento económico continuo y ayudará a salvaguardar nuestra seguridad nacional.

## Logística

La eficiencia de los procesos logísticos es esencial para la mayoría de los aspectos de nuestra vida diaria, desde la entrega del correo hasta la disponibilidad de alimentos en las tiendas de comestibles. Actualmente, Estados Unidos importa más de 100.000 contenedores diarios, cuyo contenido debe ser procesado, distribuido y puesto a disposición de los clientes.

La tecnología robótica ya se está utilizando para automatizar el manejo de contenedores en puertos de Australia y otros lugares y tiene el potencial de mejorar también el proceso de inspección. Una vez que salen del puerto o punto de origen, el movimiento de mercancías suele conllevar varios pasos. La distribución de alimentos de los agricultores a las tiendas de comestibles, por ejemplo, implica varias fases de transporte y manipulación. Aunque una parte importante de los precios de los alimentos está directamente relacionada con estos costos de transporte/logística, se ha considerado la automatización de menos del 15% del proceso de distribución de principio a fin. La tecnología robótica de próxima generación tiene el potencial de permitir una mayor optimización de dichos procesos logísticos y reducir el precio de los alimentos y otros bienes en varios por ciento. Sin embargo, para aprovechar este potencial es necesario proporcionar nuevos métodos para agarrar y manipular paquetes y nuevos métodos para detectar y manipular objetos.

## Robots médicos

Durante la última década se han logrado avances significativos en la robótica médica. Hoy en día se realizan varios miles de operaciones de próstata con robots mínimamente invasivos y el número de procedimientos cardíacos también está aumentando significativamente. Existen ventajas significativas asociadas con la cirugía mínimamente invasiva habilitada por la robótica, que incluyen incisiones más pequeñas, menos tiempo en el hospital, menos riesgo de infección, recuperación más rápida y menos efectos secundarios. En general, la calidad de la atención ha mejorado y, debido a los períodos más cortos de ausencia del trabajo, se obtienen importantes beneficios económicos. Aunque el número de procedimientos médicos para los que se utilizan robots es todavía relativamente pequeño, se espera que su uso sea amplio.

expandirse a medida que los avances en la tecnología robótica de próxima generación proporcionen mejores instalaciones para imágenes, retroalimentación al cirujano y una integración más flexible en el proceso general. Como tal, la robótica médica tiene el potencial de tener un enorme impacto, económico y de otro tipo, a medida que nuestra población envejece.

#### Cuidado de la salud

El número de personas que sufren accidentes cerebrovasculares y otras lesiones atribuibles al envejecimiento seguirá aumentando y será aún más pronunciado. Cuando las personas sufren una lesión o un derrame cerebral, es fundamental que se sometan a sesiones de fisioterapia programadas periódicamente lo antes posible para garantizar que logren una recuperación lo más completa posible. Sin embargo, a menudo la rehabilitación/formación se lleva a cabo fuera de casa y, debido a la escasez de terapeutas, suele haber graves limitaciones en materia de programación. La tecnología robótica de última generación permitirá cada vez realizar sesiones más tempranas y frecuentes, un mayor grado de adaptación en el entrenamiento y posibilitará realizar un determinado porcentaje de estos entrenamientos en casa. Al facilitar regímenes de tratamiento más consistentes y personalizados de esta manera, la rehabilitación habilitada por la robótica ofrece el potencial de una recuperación más rápida y completa del paciente. La tecnología robótica también está empezando a utilizarse en la atención sanitaria para el diagnóstico precoz del autismo, el entrenamiento de la memoria en personas con demencia y otros trastornos en los que la atención personalizada es esencial y existe la oportunidad de obtener importantes beneficios económicos.

Hoy en día ya se encuentran en el mercado los primeros productos, pero aún queda por explorar todo su potencial.

#### Servicios

El uso de la tecnología robótica en la industria de servicios abarca aplicaciones profesionales y domésticas.

En los servicios profesionales, las aplicaciones emergentes incluyen minería mejorada, cosechadoras automatizadas para agricultura y silvicultura y limpieza de instalaciones a gran escala. Las aplicaciones de servicios domésticos incluyen limpieza, vigilancia y asistencia en el hogar. Hoy en día ya se han instalado más de 4 millones de aspiradoras automáticas y el mercado sigue creciendo. Hasta ahora sólo se han seguido las aplicaciones más simples, pero una economía estadounidense cada vez más basada en los servicios ofrece un potencial significativo para que la automatización de los servicios mejore la calidad y el tiempo de entrega sin aumentar los costos. Dado que las personas trabajan más horas, es necesario brindarles asistencia en sus hogares para que tengan tiempo para actividades de ocio. Un gran desafío en la robótica de servicios será el diseño de sistemas de alto rendimiento en mercados sensibles a los precios.

#### Contexto internacional

Por supuesto, la promesa de una próspera industria robótica de próxima generación no ha pasado desapercibida. La Comisión Europea lanzó recientemente un programa mediante el cual se invierten 600 millones de euros en robótica y sistemas cognitivos con el objetivo de fortalecer la industria, particularmente en la manufactura y los servicios. Corea ha lanzado un programa comparable como parte de su iniciativa de frontera del siglo XXI, comprometiéndose a invertir mil millones de dólares en tecnología robótica durante un período de 10 años. También existen programas similares, pero más pequeños, en Australia, Singapur y China. En Estados Unidos, se han comprometido fondos para sistemas no tripulados dentro de la industria de defensa, pero se han establecido muy pocos programas en los sectores comercial, sanitario e industrial. Aunque la industria de la robótica industrial nació en Estados Unidos, el liderazgo mundial en esta área reside ahora en Japón y Europa. En áreas como la médica, la asistencia sanitaria y los servicios, Estados Unidos también ha establecido una posición de liderazgo temprana, pero hay seguidores rápidos y no está claro que seamos capaces de mantener nuestra posición de liderazgo por mucho tiempo sin un compromiso nacional para avanzar en la tecnología robótica necesaria.

# Más información

<http://www.us-robotics.us>

Contacto: Profr. Henrik Christensen

Cátedra KUKA de Robótica

Instituto de Tecnología de Georgia

Atlanta, GA 30332

Teléfono: +1 404 385 7480

Correo electrónico: hic@cc.gatech.edu



## Capítulo 1

# Prioridades de investigación en robótica y automatización para la fabricación en EE. UU.

## Resumen ejecutivo

La reestructuración de la industria manufacturera estadounidense es esencial para el futuro del crecimiento económico, la creación de nuevos empleos y garantizar la competitividad. Esto, a su vez, requiere inversión en investigación básica, desarrollo de nuevas tecnologías e integración de los resultados en los sistemas de fabricación. El 19 de diciembre de 2008, el gobierno estadounidense anunció 13.400 millones de dólares en préstamos federales de emergencia a General Motors y Chrysler para facilitar la reestructuración y fomentar nuevas investigaciones y desarrollo, un claro ejemplo de cómo Estados Unidos intenta ponerse al día en lugar de asumir el liderazgo tecnológico.

Las inversiones federales en investigación en el sector manufacturero pueden revitalizar el sector manufacturero estadounidense. Invertir una pequeña porción de nuestros recursos nacionales en una ciencia de fabricación rentable y eficiente en recursos beneficiaría a los consumidores estadounidenses y apoyaría a millones de trabajadores en este sector vital de la economía estadounidense. Permitiría que nuestra economía prosperara incluso cuando la proporción entre trabajadores y pensionados disminuye continuamente. Un programa de investigación y desarrollo de este tipo también beneficiaría a las industrias de atención médica, agricultura y transporte, y fortalecería nuestros recursos nacionales en defensa, energía y seguridad. El resultante frenesí de actividad investigadora mejoraría en gran medida la calidad del "Hecho en Estados Unidos" y revitalizaría la productividad de la manufactura estadounidense durante los próximos cincuenta años.

La robótica es una tecnología transformadora clave que puede revolucionar la fabricación. Los trabajadores estadounidenses ya no aspiran a empleos fabriles de bajo nivel y el costo de los trabajadores estadounidenses sigue aumentando debido a los costos de seguros y atención médica. Incluso cuando los trabajadores son asequibles, la próxima generación de productos miniaturizados y complejos con ciclos de vida cortos requiere adaptabilidad, precisión y confiabilidad del ensamblaje más allá de las habilidades de los trabajadores humanos. La mejora de la robótica y la automatización en la fabricación: a) retendrá la propiedad intelectual y la riqueza que se explotaría sin ella; b) salvar a las empresas haciéndolas más competitivas; c) proporcionar puestos de trabajo para desarrollar, producir, mantener y entrenar robots; d) permitir que las fábricas empleen equipos de humanos y robots que aprovechen las habilidades y fortalezas de cada uno (por ejemplo, inteligencia y destreza humanas con precisión, fuerza y repetibilidad de robots), e) mejorar las condiciones de trabajo y reducir los costosos problemas médicos; y (f) reducir el tiempo de entrega de fabricación de productos terminados, permitiendo que los sistemas respondan mejor a los cambios en la demanda minorista. De hecho, el uso eficaz de la robótica aumentará los empleos en Estados Unidos, mejorará la calidad de estos empleos y mejorará nuestra competitividad global.

**La robótica es una tecnología transformadora clave que puede revolucionar la fabricación.**

---

Este documento técnico resume la importancia estratégica de la robótica y las tecnologías de automatización para las industrias manufactureras en la economía de EE. UU., describe aplicaciones en las que la robótica y las tecnologías de automatización aumentarán drásticamente la productividad y describe una hoja de ruta visionaria de investigación y desarrollo con áreas de investigación clave para la inversión inmediata para alcanzar estas .objetivos.

## 1. Introducción

Este documento resume las actividades y los resultados de un taller sobre robótica de fabricación y automatización que contó con el apoyo de una subvención del Computing Community Consortium de la Computing Research Association. Este taller fue el primero de cuatro organizados en diversas áreas de la robótica, con el objetivo general de crear una visión convincente para la investigación y el desarrollo de la robótica, y hojas de ruta para el avance de las tecnologías robóticas para maximizar el impacto económico. La agenda de investigación propuesta en este informe conducirá a un fortalecimiento significativo del sector manufacturero de la economía estadounidense, una fuerza laboral bien capacitada y tecnológicamente astuta, la creación de nuevos empleos y una prosperidad de base amplia para los estadounidenses.

Los términos "robótica" y "automatización" tienen un significado técnico preciso. Según la Sociedad de Robótica y Automatización del Instituto de Ingenieros Electrónicos y Eléctricos, "la robótica se centra en sistemas que incorporan sensores y actuadores que funcionan de forma autónoma o semiautónoma en cooperación con humanos. La investigación en robótica enfatiza la inteligencia y la adaptabilidad para hacer frente a entornos no estructurados.

La investigación en automatización enfatiza la eficiencia, la productividad, la calidad y la confiabilidad, centrándose en sistemas que operan de forma autónoma, a menudo en entornos estructurados durante períodos prolongados, y en la estructuración explícita de dichos entornos".

El Taller de Robótica de Fabricación y Automatización se llevó a cabo el 17 de junio de 2008 en Washington DC ([http://www.us-robotics.us/?page\\_identificación=9](http://www.us-robotics.us/?page_identificación=9)). El objetivo era triple: primero, determinar la importancia estratégica de la robótica y las tecnologías de automatización en las industrias manufactureras de la economía estadounidense (Sección 2); en segundo lugar, determinar aplicaciones en las que la robótica y las tecnologías de automatización podrían aumentar la productividad (Sección 3); y tercero, determinar la investigación y el desarrollo que es necesario realizar para que la robótica y las tecnologías de automatización sean rentables en estas aplicaciones (Sección 4). Para lograrlo, se publicarán documentos técnicos que describan los usos actuales y futuros.



Arriba: Los robots son ahora algo común en la fabricación de automóviles. (Fuente: ABB Robótica)

Abajo: Los robots livianos están ingresando al mercado para el manejo de materiales a alta velocidad, por ejemplo en el procesamiento de alimentos y el embalaje de productos electrónicos. (Fuente: Adepto)



Las necesidades de la robótica en la industria fueron solicitadas a los profesionales responsables de la fabricación en sus empresas. Se solicitaron a investigadores académicos informes técnicos sobre las necesidades industriales percibidas. Se invitó a los autores de documentos técnicos aceptados (disponibles en [http://www.us-robotics.us/?page\\_id=14](http://www.us-robotics.us/?page_id=14)) a asistir al taller, donde también se invitó a autores de la industria a realizar presentaciones breves sobre los usos presentes y futuros de la robótica en sus empresas.

## 2. Importancia estratégica de la robótica en la fabricación

### 2.1. Impulso económico

La base del crecimiento económico del siglo pasado provino de la industrialización, cuyo núcleo fue la manufactura. El sector manufacturero representa el 14% del PIB de Estados Unidos y alrededor del 11% del empleo total [E07]. El 75% de las exportaciones netas de EE. UU. está relacionada con la manufactura [Estado04], por lo que el sector representa un área de extrema importancia para la salud económica general del país. Dentro del sector manufacturero, la robótica representa una industria de 5.000 millones de dólares en Estados Unidos que crece de manera constante a un ritmo del 8% anual. Esta industria central de la robótica cuenta con el respaldo de la industria manufacturera que proporciona la instrumentación, el equipo de automatización auxiliar y la integración de sistemas, lo que suma una industria de 20 mil millones de dólares.

La economía manufacturera estadounidense ha cambiado significativamente en los últimos 30 años. A pesar de las importantes pérdidas sufridas por Canadá, China, México y Japón en los últimos años, la manufactura todavía representa un sector importante de la economía estadounidense. La manufactura, que incluye la producción de todos los bienes, desde electrónica de consumo hasta equipos industriales, representa el 14% del PIB de EE.UU. y el 11% del empleo estadounidense [WB06]. La productividad manufacturera estadounidense supera la de sus principales socios comerciales. Lideramos a todos los países en productividad, tanto por hora como por empleado [DoC04]. Nuestra productividad per cápita continúa aumentando con un aumento de más del 100% en las últimas tres décadas. De hecho, es esta creciente productividad la que mantiene competitiva la industria manufacturera estadounidense en medio de la recesión y la recuperación y frente al sorprendente crecimiento de China, India y otras economías emergentes. Gran parte de este aumento de la productividad y la eficiencia se puede atribuir a las innovaciones tecnológicas y al uso de la tecnología en el diseño de productos y los procesos de fabricación.

Sin embargo, esta dinámica también está cambiando. Los ambiciosos competidores extranjeros están invirtiendo en investigación y educación fundamentales que mejorarán sus procesos de fabricación. Por otro lado, la fracción de la producción manufacturera estadounidense que se invierte en investigación y desarrollo se ha mantenido esencialmente constante durante este periodo. La participación estadounidense en la financiación total de investigación y desarrollo en el mundo ha caído significativamente a sólo el 30%. Nuestros competidores extranjeros están utilizando las mismas innovaciones en tecnología con, en algunos casos, costos laborales significativamente más bajos para socavar el dominio estadounidense, por lo que la industria manufacturera estadounidense enfrenta una presión cada vez mayor. Nuestra balanza comercial de productos manufacturados está cayendo a una cifra alarmante de 50 mil millones de dólares por década. Además, con el envejecimiento de nuestra población, el número de trabajadores también está disminuyendo rápidamente y las proyecciones optimistas apuntan a dos trabajadores por pensionado en 2050 [E07]. Los trabajadores robóticos deben tomar el relevo de los trabajadores humanos para sostener los aumentos de productividad que se necesitan con una disminución en el número de trabajadores. Por último, los espectaculares avances en robótica y tecnologías de automatización son aún más críticos con la próxima generación de productos de alto valor que dependen de computadoras integradas, sensores avanzados y microelectrónica que requieren ensamblaje a micro y nanoescala, para lo cual se requiere una fabricación intensiva en mano de obra con trabajadores humanos. ya no es una opción viable.

A diferencia de Estados Unidos, China, Corea del Sur, Japón e India están invirtiendo fuertemente en educación superior e investigación [NAE07]. India y China están atrayendo sistemáticamente a sus científicos e ingenieros a regresar a Estados Unidos después de que se hayan capacitado en los EE. UU. Según [NAE07], "...en esencia, están enviando estudiantes para que adquieran habilidades y proporcionándoles empleos para atraerlos de regreso". Este contraste en la inversión es evidente en las áreas específicas relacionadas con la robótica y la manufactura. Corea está invirtiendo 100 millones de dólares al año durante 10 años (2002-2012) en la investigación y educación en robótica como parte de su programa de frontera del siglo XXI. La Comisión Europea está invirtiendo 600 millones de dólares en robótica y sistemas cognitivos como parte del Séptimo Programa Marco. Aunque es más pequeño en comparación con los compromisos de Corea y la Comisión Europea, Japón está invirtiendo 350 millones de dólares durante los próximos 10 años en robótica humanoide, robótica de servicios y entornos inteligentes. La inversión federal estadounidense no relacionada con la defensa es pequeña, según la mayoría de las medidas, en comparación con estas inversiones.



Los nuevos robots móviles están permitiendo nuevos paradigmas en logística y gestión de almacenes con mayor productividad, velocidad, precisión y flexibilidad. (Fuente: Sistemas KIVA)

## 2.2. Áreas de crecimiento

El Departamento de Comercio y el Consejo de Competitividad [CoC08, DoC04] han analizado un amplio conjunto de 280 empresas, así como sus tasas de crecimiento anual consolidadas. Los datos categorizados para los principales sectores industriales se muestran en la siguiente tabla.

Sector	crecimiento promedio	crecimiento
Robótica: fabricación, servicios y medicina.	20%	0-120%
Empresas de propiedad intelectual	21%	15-26%
Atención sanitaria/cuidado de personas mayores	62%	6-542%
Entretenimiento/juguetes	6%	4-17%
Medios/Juegos	14%	-2-36%
electrodomésticos	1%	-4-7%
Bienes de capital	8%	-4-20%
Automotor	0%	-11-13%
Logística	21%	4-96%
Automatización	4%	2-8%

Tasas de crecimiento anual consolidadas sobre un conjunto de 280 empresas estadounidenses para el período 2004-2007.

Las áreas de crecimiento actuales para la fabricación incluyen la logística, incluido el manejo de materiales, y la robótica. Dada la importancia de la manufactura en general, es esencial considerar cómo se puede aprovechar tecnología como la robótica para fortalecer la industria manufacturera estadounidense.

## 2.3. Una visión para la fabricación

La fabricación estadounidense actual es donde estaba la tecnología de bases de datos a principios de los años 1960, un mosaico de soluciones ad hoc que carecían de la metodología rigurosa que conduce a la innovación científica. En 1970, cuando Ted Codd, un matemático de IBM, inventó el álgebra relacional, un elegante modelo matemático de base de datos que impulsó la investigación y la educación financiadas con fondos federales y condujo a la actual industria de bases de datos de 14 mil millones de dólares.

La industria manufacturera se beneficiaría enormemente si se pudieran desarrollar modelos análogos. Así como el método para sumar dos números no depende del tipo de lápiz que se utilice, las abstracciones de fabricación pueden ser totalmente independientes del producto que se esté fabricando o de los sistemas de línea de montaje utilizados para ensamblarlo.

Otro precedente es la Máquina de Turing, un elegante modelo abstracto inventado por Alan Turing en la década de 1930, que sentó las bases matemáticas y científicas de nuestras ahora exitosas industrias de alta tecnología. Una analogía con la máquina de Turing en cuanto a diseño, automatización y fabricación podría producir enormes beneficios. Los recientes avances en informática y ciencias de la información ahora permiten modelar y razonar sobre los procesos de fabricación física, preparando el terreno para que los investigadores "pongan a Turing en la fabricación". El resultado, al igual que con las bases de datos y las computadoras, sería una mayor calidad, productos más confiables, costos reducidos y una entrega más rápida [GK07].

Un uso más eficaz de la robótica, a través de tecnologías robóticas mejoradas y una fuerza laboral bien capacitada, aumentará los empleos en Estados Unidos y la competitividad global. Los trabajadores de las líneas de montaje tradicionales se acercan a la edad de jubilación. Actualmente, los trabajadores estadounidenses no están bien capacitados para trabajar con tecnologías robóticas y los costos de los seguros y la atención médica siguen aumentando. Incluso cuando los trabajadores son asequibles, la próxima generación de productos miniaturizados y complejos con ciclos de vida cortos requiere adaptabilidad, precisión y confiabilidad del ensamblaje más allá de las habilidades de los trabajadores humanos. El despliegue generalizado de robótica mejorada y automatización en la fabricación:

(a) retendrá la propiedad intelectual y la riqueza que sin ella se iría al extranjero, (b) salvará a las empresas haciéndolas más competitivas, (c) proporcionará empleos para mantener y entrenar robots, (d) permitir que las fábricas empleen equipos de humanos y robots que aprovechen de manera segura las fortalezas de los demás (por ejemplo, los humanos son mejores para lidiar con eventos inesperados para mantener las líneas de producción en funcionamiento, mientras que los robots tienen mejor precisión y repetibilidad, y pueden levantar piezas pesadas), (e) reducir los costosos problemas médicos, por ejemplo, el síndrome del túnel carpiano, lesiones de espalda, quemaduras e inhalación de gases y vapores nocivos, y (f) reducir el tiempo de tramitación de los productos terminados, permitiendo que los sistemas respondan mejor a los cambios en la demanda minorista .

Las inversiones en investigación y educación en el sector manufacturero pueden revitalizar el sector manufacturero estadounidense. Invertir una pequeña porción de nuestros recursos nacionales en una ciencia de fabricación rentable y eficiente en recursos beneficiaría a los consumidores estadounidenses y apoyaría a millones de trabajadores en este sector vital de la economía estadounidense. Tales inversiones beneficiarían la atención médica, la agricultura y el transporte, y fortalecerían nuestros recursos nacionales en defensa, energía y seguridad. El resultante frenesí de actividad investigadora revitalizaría la calidad y productividad del "Hecho en Estados Unidos" durante los próximos cincuenta años.

### 3. Hoja de ruta de la investigación

#### 3.1. Proceso

La hoja de ruta de tecnología de fabricación describe una visión para el desarrollo de capacidades críticas para la fabricación mediante el desarrollo de un conjunto de tecnologías básicas en robótica. Cada capacidad crítica surge de uno o más dominios de aplicación amplios e importantes dentro de la fabricación. Estos señalan las principales áreas tecnológicas para la investigación y el desarrollo básicos (como se muestra en la Figura 1 y se analiza en la Sección 4). La integración de todas las partes de esta hoja de ruta en un programa cohesivo es esencial para crear la revitalización deseada de la manufactura en los EE. UU.

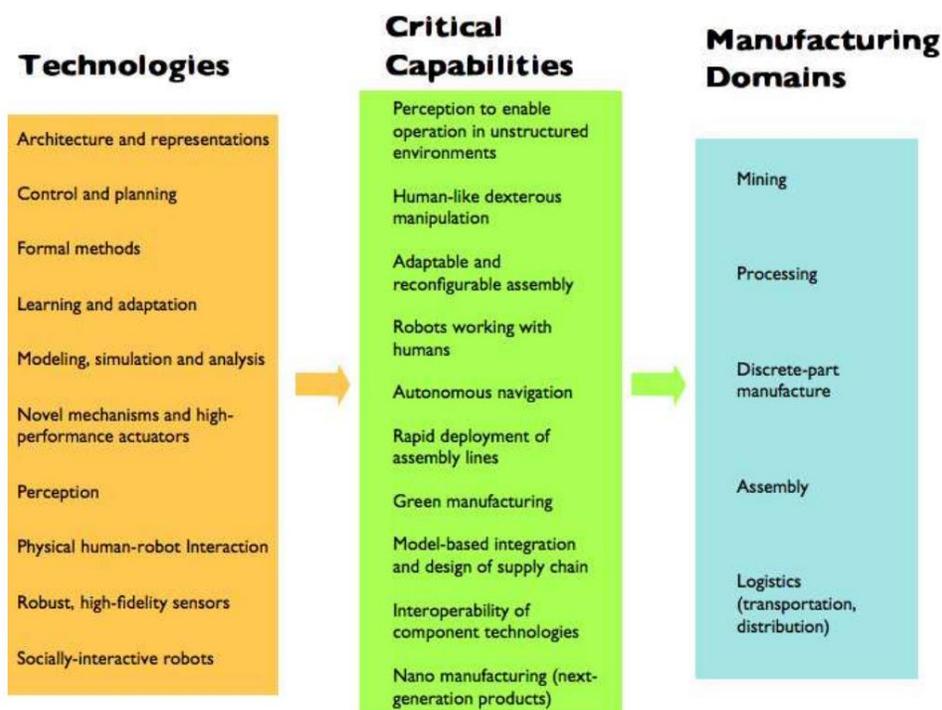


Figura 1: El proceso de la hoja de ruta: se necesita investigación y desarrollo en áreas tecnológicas que surgen de las capacidades críticas necesarias para impactar los dominios de aplicaciones de fabricación.

#### 3.2. Viñetas de robótica y fabricación

Discutimos brevemente las aplicaciones motivadoras con viñetas y las capacidades críticas necesarias para un impacto positivo dramático en las aplicaciones. Las viñetas sirven para ilustrar cambios de paradigma en la fabricación y como ejemplos de integración entre áreas de capacidad y tecnología. La hoja de ruta articula hitos de diez y quince años para las capacidades críticas.

##### Viñeta 1: Robots asistentes en la línea de montaje

Un fabricante de automóviles experimenta un aumento en los pedidos de su nuevo diseño de automóvil eléctrico y necesita fusionar rápidamente su capacidad de producción con otros modelos anteriores que ya están en producción. Las tareas de montaje se reasignan rápidamente para dar cabida al nuevo modelo de coche, más eficiente. Se incorpora un conjunto de robots asistentes en la línea de montaje y se configuran rápidamente para trabajar junto con los trabajadores humanos reentrenados en las nuevas tareas. Se organiza un turno de práctica para el sensor del robot.

sistemas y algoritmos de aprendizaje de robots para afinar los parámetros, y luego se pone en funcionamiento el segundo turno, duplicando la producción de la planta en cuatro días. Luego, un cambio por parte de un proveedor clave requiere que se modifique la secuencia de ensamblaje para acomodar una nueva tolerancia en el ensamblaje del paquete de baterías. Los ingenieros utilizan herramientas computacionales para modificar rápidamente la secuencia de ensamblaje: luego imprimen nuevas instrucciones para los trabajadores y cargan programas de ensamblaje modificados a los robots asistentes.

**Viñeta 2: Fabricación y montaje de piezas discretas, únicas en su tipo. Una mañana, un terapeuta**

ocupacional se acerca a un pequeño taller con 5 empleados que atiende principalmente pedidos de empresas de dispositivos médicos para crear un dispositivo de entrada personalizado controlado por la cabeza para un usuario tetrapléjico en silla de ruedas. Hoy en día, la producción de dispositivos tan únicos sería prohibitivamente costosa debido al tiempo y la mano de obra necesarios para instalar las máquinas y ensamblarlos. El propietario del taller reprograma un robot mediante comandos de voz y gestos, enseñándole al robot cuándo se atasca. El robot puede llevar el material a fresadoras y tornos y hacer funcionar las máquinas. Mientras las máquinas están en funcionamiento, el robot configura los componentes mecánicos y electrónicos necesarios y solicita ayuda cuando hay ambigüedad en el conjunto de instrucciones. Mientras se mueve de una estación a otra, el robot puede limpiar un derrame de refrigerante y alertar a un humano sobre problemas de seguridad con una celda de trabajo. El robot responde a una solicitud de un recado rápido para el capataz del taller entre trabajos, pero es capaz de decir no a otra solicitud que habría resultado en un retraso en su trabajo principal. El robot ensambla los componentes y el joystick está listo para ser recogido a primera hora de la tarde. Esto sucede con una mínima interrupción del horario del taller.

**Viñeta 3: Diseño rápido, integrado y basado en modelos de la cadena de suministro**

Se ha descubierto que el envase de fórmula infantil de un importante proveedor de un país extranjero sufre graves problemas de control de calidad. El ingeniero líder con sede en EE. UU. es capaz de utilizar un modelo integral, discreto y continuo de múltiples escalas de toda la cadena de suministro, presentar nuevos proveedores, reutilizar partes de la cadena de suministro y efectuar una transformación completa de la cadena de eventos: producción, distribución, empaque de cajas, suministro y distribución. Un aspecto importante de la transformación es la introducción de 20 robots para fabricar rápidamente el paquete rediseñado.

Estas viñetas pueden parecer descabelladas hoy en día, pero tenemos la base tecnológica, la experiencia colectiva y la infraestructura educativa para desarrollar las capacidades amplias necesarias para hacer realidad esta visión en 15 años con inversiones apropiadas en las áreas tecnológicas críticas.

## 3.3. Capacidades críticas para la fabricación

En esta sección, analizamos brevemente las capacidades críticas y damos ejemplos de posibles hitos de 5, 10 y 15 años. Después de esto, en la Sección 4 describimos algunas direcciones de investigación prometedoras que podrían permitirnos alcanzar estos hitos.

### 3.3.1. Conjunto adaptable y reconfigurable

Hoy en día, el desfase entre el diseño conceptual de un nuevo producto y la producción en una línea de montaje en Estados Unidos es inaceptablemente alto. Para un coche nuevo, este plazo de entrega puede llegar a veinticuatro meses.

Dado un nuevo producto y un conjunto de subsistemas de línea de ensamblaje que se pueden usar para fabricar el producto, queremos lograr la capacidad de adaptar los subsistemas, reconfigurarlos y configurar celdas de trabajo para producir el producto. En consecuencia, la hoja de ruta para un montaje adaptable y reconfigurable incluye los siguientes objetivos para los próximos quince años.

5 años: Logre la capacidad de instalar, configurar y programar operaciones básicas de línea de ensamblaje para nuevos productos con un brazo robótico industrial específico, herramientas y dispositivos auxiliares de manipulación de materiales en menos de 24 horas.

10 años: Lograr la capacidad de instalar, configurar y programar operaciones básicas de línea de ensamblaje para nuevos productos con un brazo robótico industrial específico, herramientas y dispositivos auxiliares de manipulación de materiales en un turno de 8 horas.

15 años: Lograr la capacidad de instalar, configurar y programar operaciones básicas de línea de ensamblaje para nuevos productos con un brazo robótico industrial específico, herramientas y dispositivos auxiliares de manipulación de materiales en una hora.

### 3.3.2. Navegación Autónoma

La navegación autónoma es una capacidad básica que afectará la automatización de los equipos de minería y construcción, el transporte eficiente de materias primas a las plantas de procesamiento, los vehículos guiados automatizados para el manejo de materiales en las líneas de ensamblaje y las operaciones de apoyo logístico, como el almacenamiento y la distribución. Permitir una navegación autónoma segura en entornos no estructurados con obstáculos estáticos, vehículos conducidos por humanos, peatones y animales requerirá importantes inversiones en tecnologías de componentes. La hoja de ruta para la navegación autónoma consta de los siguientes hitos.

5 años: Los vehículos autónomos serán capaces de circular en cualquier pueblo o ciudad moderna con carreteras claramente iluminadas y señalizadas y demostrarán una conducción segura comparable a la de un conductor humano. El rendimiento de los vehículos autónomos será superior al de los conductores humanos en tareas como navegar a través de un área minera industrial o una zona de construcción, retroceder en un muelle de carga, estacionamiento en paralelo y frenado y parada de emergencia.

10 años: Los vehículos autónomos serán capaces de conducir en cualquier ciudad y en caminos no pavimentados, y exhibirán una capacidad limitada para entornos todoterreno en los que los humanos pueden conducir, y serán tan seguros como el automóvil promedio conducido por humanos.

15 años: Los vehículos autónomos serán capaces de circular en cualquier entorno en el que los humanos puedan conducir. Su habilidad para conducir será indistinguible de la de los humanos, excepto que los conductores robóticos serán más seguros y predecibles que un conductor humano con menos de un año de experiencia en conducción.

### 3.3.3. Fabricación verde

Como dijo el arquitecto estadounidense William McDonough, "la contaminación es un símbolo de fracaso en el diseño [y la fabricación]". Nuestro enfoque actual de fabricación, en el que se integran componentes y luego subsistemas para cumplir con especificaciones de arriba hacia abajo, debe repensarse por completo para permitir una fabricación ecológica. Las soluciones actuales para reducir los residuos de fabricación se centran principalmente en los residuos de procesos, los residuos de servicios públicos y los residuos de paradas y mantenimiento. Nuestra hoja de ruta para la fabricación ecológica enfatiza el reciclaje de todos los componentes y subsistemas utilizados durante todo el proceso de fabricación, desde la extracción y el procesamiento de materias primas hasta la producción y distribución de productos terminados. Estamos particularmente preocupados por la reutilización de la infraestructura de fabricación, el reciclaje de materias primas, la minimización de los requisitos de energía y potencia en cada paso y la reutilización de subsistemas para la producción de nuevos productos.

5 años: El proceso de fabricación reciclará el 10% de las materias primas, reutilizará el 50% de los equipos y utilizará sólo el 90% de la energía utilizada en 2010 para el mismo proceso.

10 años: El proceso de fabricación reciclará el 25% de las materias primas, reutilizará el 75% de los equipos y utilizará sólo el 50% de la energía utilizada en 2010 para el mismo proceso.

15 años: El proceso de fabricación reciclará el 75% de las materias primas, reutilizará el 90% de los equipos y utilizará sólo el 10% de la energía utilizada en 2010 para el mismo proceso.

### 3.3.4. Manipulación diestra similar a la humana

Los brazos y las manos de los robots acabarán superando a las manos humanas. Esto ya es cierto en términos de velocidad y fuerza. Sin embargo, las manos humanas todavía superan a sus homólogos robóticos en tareas que requieren una manipulación diestra. Esto se debe a lagunas en áreas tecnológicas clave, especialmente en la percepción, la detección robusta de alta idealidad y la planificación y el control. La hoja de ruta para una manipulación diestra similar a la humana consta de los siguientes hitos.

5 años: Las manos de baja complejidad con un pequeño número de articulaciones independientes serán capaces de adquirir un agarre sólido de toda la mano.

10 años: Manos de complejidad media con decenas de articulaciones independientes y mecanismos y actuadores novedosos serán capaces de adquirir agarre con toda la mano y manipulación con destreza limitada.

15 años: Manos de alta complejidad con densidades de matriz táctil cercanas a las de los humanos y con un rendimiento dinámico superior serán capaces de adquirir un agarre robusto con toda la mano y manipular con destreza objetos que se encuentran en entornos de fabricación utilizados por trabajadores humanos.

### 3.3.5. Integración y diseño de la cadena de suministro basados en modelos

Los recientes avances en informática y ciencias de la información han hecho posible modelar y razonar sobre los procesos de fabricación física, preparando el terreno para que los investigadores "pongan a Turing en la fabricación". Si se logra, como ocurre con las bases de datos y las computadoras, permitirá la interoperabilidad de componentes y subsistemas y productos de mayor calidad y confiabilidad, costos reducidos y entregas más rápidas. En consecuencia, nuestra hoja de ruta debe incluir logros que demuestren los siguientes hitos.

5 años: Diseños seguros y correctos comprobados para la fabricación y el ensamblaje de piezas discretas para que no se creen errores durante la construcción de la instalación de fabricación.

10 años: diseños seguros y demostrablemente correctos para toda la cadena de suministro de fabricación en múltiples escalas de tiempo y longitud, de modo que no se creen errores durante el diseño de la cadena de suministro de fabricación.

15 años: Fabricación de productos de próxima generación: con avances en ciencia y tecnología a micro y nanoescala, y nuevos procesos de fabricación, podremos desarrollar diseños seguros y demostrablemente correctos para cualquier línea de productos.

### 3.3.6. Nanofabricación

Los circuitos integrados y los paradigmas informáticos clásicos basados en CMOS se están complementando con nuevos sustratos informáticos nanofabricados. Estamos viendo el crecimiento de tecnologías de microsistemas sin silicio y enfoques novedosos para la fabricación de estructuras utilizando técnicas sintéticas vistas en la naturaleza. Los avances en MEMS, VLSI de baja potencia y la nanotecnología ya están permitiendo robots autoalimentados de menos de mm. Es probable que surjan nuevas tecnologías de ensamblaje paralelas, e incluso estocásticas, para una producción de bajo costo. Muchos paradigmas convencionales de fabricación serán reemplazados por nuevos enfoques de nanofabricación aún por imaginar. En consecuencia, la hoja de ruta para la nanofabricación y la nanorobótica debe hacer hincapié en la investigación y el desarrollo básicos de la siguiente manera.

5 años: Tecnologías para el ensamblaje masivo en paralelo mediante el autoensamblaje y aprovechamiento de la biología para desarrollar enfoques novedosos para la fabricación con materiales orgánicos.

10 años: Fabricación para la revolución post-CMOS que permitirá la próxima generación de electrónica molecular y computadoras orgánicas

15 años: Nanofabricación de nanorobots para administración de fármacos, terapéutica y diagnóstico.

### 3.3.7. Percepción de entornos no estructurados

La automatización en la fabricación ha demostrado ser más sencilla para la producción en masa con automatización fija, y la promesa de una automatización flexible y una automatización para la personalización en masa no se ha cumplido excepto en casos especiales. Una de las razones principales es que la automatización fija se presta a entornos muy estructurados en los que los desafíos para crear máquinas de fabricación "inteligentes" se simplifican enormemente. La automatización para lotes pequeños requiere que los robots sean más inteligentes, más flexibles y capaces de operar de forma segura en entornos menos estructurados compartidos con trabajadores humanos. Por ejemplo, en diseños de producto bajo, los robots y otras máquinas van a varios sitios operativos del producto (por ejemplo, un avión o un barco) para realizar sus tareas, mientras que en un diseño funcional, el producto viaja a varias máquinas.

Los desafíos de la fabricación única exacerban estas dificultades. La hoja de ruta para la percepción incluye los siguientes hitos.

5 años: percepción tridimensional que permite la automatización incluso en entornos no estructurados típicos de un taller dedicado a operaciones de fabricación por lotes

10 años: Percepción a favor de la automatización de lotes pequeños, por ejemplo, ayudas médicas especializadas, estructuras para sillas de ruedas y ayudas portátiles.

15 años: Percepción de una fabricación verdaderamente única, que incluye dispositivos de asistencia personalizados, muebles personalizados, embarcaciones de superficie y submarinas especializadas y naves espaciales para la exploración y colonización planetaria.

### 3.3.8. Robots intrínsecamente seguros que trabajan con humanos

La robótica ha logrado avances significativos para permitir una autonomía total y una autonomía compartida en tareas como conducir vehículos, fisioterapia humana y transportar piezas pesadas (mediante cobots). Aprovechar estos avances para permitir la autonomía y la autonomía compartida en otras tareas como el montaje y la manipulación plantea un desafío importante.

Los expertos de la industria automotriz reconocen los beneficios del soporte de automatización para los trabajadores humanos, ya sea en forma de asistentes humanoides o máquinas inteligentes que interactúan de manera segura con los trabajadores humanos. Para definir los hitos de la investigación proponemos tres niveles de capacidad de la línea de montaje:

1. Habilidad de nivel I: los humanos no requieren habilidades especiales y <1 hora de entrenamiento. Ejemplos: pick and place, inserción, embalaje. Un punto de referencia canónico que se puede utilizar para realizar pruebas y comparar entre grupos podrían ser tareas genéricas como roscar y desenroscar una tuerca y un perno estándar de 1".
2. Habilidad de nivel II: los humanos requieren habilidades menores y de 1 a 10 horas de entrenamiento. ejemplos: cortar / dar forma, soldar, remachar. Un punto de referencia canónico podría ser desmontar y volver a montar una linterna estándar específica.
3. Habilidad Nivel III: los humanos requieren habilidad y > 10 horas de entrenamiento. Ejemplos: soldadura estándar especificada, mecanizado, inspección de puntos de referencia.

La hoja de ruta para los robots que trabajan con humanos es la siguiente.

5 años: Demostrar un prototipo de robot de línea de ensamblaje con sensores que pueden detectar y responder a gestos y movimientos humanos en su espacio de trabajo mientras se desempeña consistentemente en el Nivel I (ver arriba) junto a un humano durante 8 horas sin requerir ninguna intervención de las personas cercanas. .

10 años: Demostrar un prototipo de robot de línea de ensamblaje con sensores que pueden detectar y responder a gestos y movimientos humanos en su espacio de trabajo mientras se desempeña constantemente en el Nivel II junto a un humano durante 40 horas sin requerir ninguna intervención de las personas cercanas.

15 años: Demostrar un robot de línea de ensamblaje disponible comercialmente con sensores que pueden detectar y responder a gestos y movimientos humanos en su espacio de trabajo mientras se desempeña consistentemente en una capacidad de Nivel III junto a un humano durante 80 horas sin requerir ninguna intervención de las personas cercanas.

### 3.3.9. Educación y entrenamiento

Estados Unidos sólo puede aprovechar los nuevos resultados de investigación y tecnología si cuenta con una fuerza laboral bien capacitada en los conceptos básicos de la robótica y las tecnologías relevantes. Esta fuerza laboral debe tener una amplia gama de niveles de habilidades y conocimientos, desde personas capacitadas en escuelas vocacionales y colegios comunitarios para operar equipos de fabricación de alta tecnología, hasta desarrolladores de nivel BS y MS capacitados para crear equipos de fabricación robustos de alta tecnología, hasta doctorados. Investigadores básicos de nivel básico capacitados para desarrollar y probar nuevas teorías, modelos y algoritmos para robots de próxima generación. Para formar a la mejor fuerza laboral, las oportunidades educativas deben estar ampliamente disponibles. La hoja de ruta para la fuerza laboral es la siguiente.

5 años: Cada escuela secundaria pública de EE. UU. tiene un programa de robótica disponible después de la escuela. El programa incluye varios eventos públicos informativos y competitivos durante cada sesión, y los participantes reciben un reconocimiento comparable al de otras actividades extracurriculares populares.

10 años: además de la meta de 5 años, cada colegio y universidad de 4 años ofrece concentraciones en robótica para aumentar muchos títulos de licenciatura, maestría y doctorado.

15 años: El número de estudiantes de posgrado nacionales en todos los niveles con formación en robótica es el doble que en 2008. Están activos diez programas de licenciatura en robótica aprobados por ABET y 10 programas de doctorado en robótica.

## 4. Investigación y desarrollo: direcciones prometedoras

Lograr las capacidades críticas descritas en la Sección 3 anterior y enumeradas en la columna central de la Figura 1 requiere investigación y desarrollo básicos de las tecnologías enumeradas en la columna izquierda de la Figura 1. Estas tecnologías están brillantemente motivadas y se describen a continuación junto con direcciones de investigación prometedoras. Nota que cada uno soporta más de una capacidad crítica. Por ejemplo, la tecnología de "Percepción" impacta directamente en la "Operación en entornos no estructurados", "Robots intrínsecamente seguros que trabajan con humanos", "Navegación autónoma" y "Manipulación diestra similar a la humana".

### 4.1. Aprendizaje y adaptación

Una de las mayores barreras para el uso de robots en las fábricas es el alto costo de ingeniería de las células de trabajo, es decir, el diseño, fabricación e instalación de plantillas, accesorios, transportadores y sensores y dispositivos de terceros.

software. Estos costos de ingeniería suelen ser varias veces superiores al costo del hardware robótico primario. Los robots deben poder realizar sus tareas en entornos con mayor incertidumbre de la que los sistemas actuales pueden tolerar. Una posible forma de lograrlo es mediante el aprendizaje mediante demostración. En este caso, un humano realiza la tarea varias veces sin el entorno diseñado mientras el robot observa. Luego, el robot aprende a imitar al humano realizando repetidamente la misma tarea de manera segura y compara sus acciones y resultados de la tarea con los del humano. Los robots también podrían adaptarse monitoreando sus acciones, comparándolas con representaciones de tareas nominales parametrizadas y ajustando los parámetros para optimizar su desempeño.

## 4.2. Modelado, Análisis, Simulación y Control

El modelado, el análisis, la simulación y el control son esenciales para comprender sistemas complejos, como los sistemas de fabricación. Los sistemas de fabricación futuros requerirán modelos de piezas o subconjuntos en contacto intermitente, materiales flexibles en forma de láminas, enlaces con cadenas cerradas, sistemas con topologías cinemáticas cambiantes y física relevante en las escalas micro y nano. Para aprovecharlos para diseñar sistemas de fabricación mejorados, los modelos y las técnicas de simulación resultantes deben validarse experimentalmente y combinarse con técnicas de investigación y optimización. Con modelos y técnicas de simulación mejorados y con computación de alto rendimiento mejorada, tendremos la capacidad de simular todos los aspectos de los sistemas de fabricación, desde la extracción de materias primas hasta la producción de piezas, el ensamblaje y las pruebas.

## 4.3. Métodos formales

En algunos dominios, se han utilizado modelos matemáticos y herramientas de la lógica para guiar la especificación, el desarrollo y la verificación de sistemas de software y hardware. Debido al alto costo de aplicación, estos métodos formales se han utilizado en importantes esfuerzos de fabricación, principalmente cuando la integridad del sistema es de suma importancia, como en naves espaciales y aviones comerciales. Sin embargo, no es el único costo que impide el uso común de métodos formales en el desarrollo de sistemas de fabricación (y muchos otros sistemas de ingeniería). La falta de uso también está relacionada con las limitaciones del marco para representar operaciones de fabricación importantes, como el ensamblaje de piezas, que pueden verse como sistemas híbridos con restricciones de desigualdad no lineales disyuntivas de muchas variables continuas.

## 4.4. Control y planificación

Los robots del futuro necesitarán algoritmos de control y planificación más avanzados capaces de manejar sistemas con mayor incertidumbre, tolerancias más amplias y mayores grados de libertad que los que pueden manejar los sistemas actuales. Probablemente necesitaremos brazos robóticos sobre bases móviles cuyos efectores finales puedan posicionarse con suficiente precisión para realizar tareas de manipulación fina a pesar de que la base no esté anclada rígidamente al suelo. Estos robots podrían tener un total de 12 grados de libertad. En el otro extremo están los robots humanoides antropomórficos que podrían tener hasta 60 grados de libertad. Nuevos y poderosos métodos de planificación, posiblemente combinando nuevas técnicas de topología matemática y métodos de planificación recientes basados en muestreo, pueden ser capaces de buscar de manera efectiva los espacios relevantes de alta dimensión.

## 4.5. Percepción

Los futuros robots industriales necesitarán sistemas de percepción mucho mejores para poder monitorear el progreso de sus tareas y las de quienes los rodean. Más allá del monitoreo de tareas, los robots deberían poder inspeccionar subconjuntos y componentes de productos en tiempo real para evitar perder tiempo y dinero en productos con piezas fuera de especificaciones. También deberían poder estimar el estado físico y emocional de los humanos, ya que esta información es necesaria para mantener la máxima productividad. Para ello necesitamos mejores sensores táctiles y de fuerza y mejores métodos de comprensión de imágenes. Los desafíos importantes incluyen sensores biométricos no invasivos y modelos utilizables del comportamiento y las emociones humanas.

El gran coste de ingeniería de las células de trabajo se debe principalmente a la necesidad de reducir la incertidumbre. Para eliminar este costo, los robots deben ser capaces de eliminar la incertidumbre mediante sensores de alta idealidad o acciones que reduzcan la incertidumbre. Los sensores deben poder construir modelos físicos y de ingeniería de piezas críticas para una tarea de ensamblaje y rastrear el progreso de la tarea. Si esta tarea la realiza total o parcialmente una persona, entonces los sensores biométricos no invasivos también deben determinar el estado de la persona. Las acciones de agarre y las estrategias de ensamblaje que anteriormente dependían de herramientas costosas deben rediseñarse para que aprovechen el cumplimiento para eliminar la incertidumbre.

## 4.6. Mecanismos novedosos y actuadores de alto rendimiento

Los mecanismos y actuadores mejorados generalmente conducirán a robots con un rendimiento mejorado, por lo que se necesita investigación fundamental sobre estos temas. Sin embargo, a medida que la robótica se aplica a aplicaciones en dominios novedosos como la manipulación de piezas en las escalas nano y micro, entornos sensibles a los materiales, como los que rodean a los escáneres de resonancia magnética, y entornos compartidos con humanos, los diseños (incluidas las elecciones de materiales) Habrá que repensar el diseño de actuadores y mecanismos. Los nuevos mecanismos para el aumento humano incluyen exoesqueletos, prótesis inteligentes y dispositivos pasivos. Estos sistemas requerirán altas relaciones resistencia-peso, actuadores con bajas emisiones (incluido el ruido y las electromagnéticas) e interfaces naturales entre el ser humano y los mecanismos.

## 4.7. Interacción humano-robot

Los robots de las fábricas futuras estarán en contacto físico con humanos y otros robots, si no directamente, sí a través de un objeto que ambos agarren simultáneamente. También puede ocurrir un contacto involuntario. Cuando los robots colaboran con los humanos, deben poder reconocer las actividades humanas para mantener una sincronía adecuada en las tareas. Por último, los robots deben poder comunicarse con los humanos de múltiples formas; Verbal y no verbalmente, y debe ser fácil de entrenar. Estas situaciones sugieren la necesidad de nuevos sistemas de detección con anchos de banda y resoluciones más altos que los disponibles hoy en día, el uso de sistemas de detección que capturen datos biométricos de trabajadores humanos que anteriormente se habían ignorado en el control de robots, y el diseño de robots intrínsecamente seguros con fallas. Sistemas operativos seguros y herramientas para verificar la seguridad y corrección de los programas de robots.

## 4.8. Arquitectura y representaciones

Los nuevos robots de fabricación deben ser lo suficientemente inteligentes como para compartir espacio de manera productiva con humanos y otros robots y aprender cómo mejorar su efectividad con la experiencia. Para respaldar dicho aprendizaje, los sistemas operativos de los robots y los modelos y algoritmos detrás de ellos deben ser lo suficientemente expresivos y estructurados adecuadamente. Necesitarán formas de representar las diversas habilidades de manipulación y las propiedades físicas relevantes del entorno para incorporar su impacto en la ejecución de la tarea. Debería haber

bucles continuos de percepción-acción de bajo nivel cuyos acoplamientos están controlados por el razonamiento de alto nivel. Los robots explotarán representaciones de habilidades ricas y flexibles junto con la observación de humanos y otros robots para aprender nuevas habilidades de forma autónoma. Los robots necesitarán nuevos métodos para representar las incertidumbres ambientales y monitorear tareas que faciliten la recuperación de errores y la mejora de habilidades basadas en estos errores.

## 5. Referencias

[BEA07] Oficina de Análisis Económico, Comunicado de prensa del Departamento de Comercio de EE. UU., 24 de abril de 2007. [www.bea.gov/newsreleases/industry/gdpindustry/2007/gdpind06.htm](http://www.bea.gov/newsreleases/industry/gdpindustry/2007/gdpind06.htm).

[CoC08] Consejo de Competitividad, Agenda de Competitividad - Nuevos desafíos, nuevas respuestas, noviembre de 2008, ([www.compete.org](http://www.compete.org))

[DoC04] Departamento de Comercio de EE. UU., Fabricación en Estados Unidos, enero de 2004 (ISBN 0-16-068028-X).

[E07] Hoja informativa sobre EE. UU., Economist, junio de 2007.

[EF 06] Fuchs, E. El impacto de la fabricación en tierra en las vías de desarrollo tecnológico en las industrias automotriz y optoelectrónica. Doctor. Tesis. MIT Cambridge, MA: 2006.

[GK07] Goldberg, K., Kumar, V, "Made in the USA" can be Revitalized, San Jose Mercury News: Op Ed, 24, octubre de 2007

[NAE07] Levantándose por encima de la tormenta que se avecina: Energizar y emplear a Estados Unidos para un futuro económico más brillante, Academia Nacional de Ingeniería, 2007.

[WB06] ¿Dónde está la riqueza de las naciones? Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento, Banco Mundial, 2006.

## 6. Colaboradores

Este informe tiene su origen en presentaciones y debates en un taller sobre robótica de fabricación y automatización que tuvo lugar el 17 de junio de 2008 en Washington, DC. El informe forma parte del estudio del CCC sobre Robótica. El Computing Community Consortium (CCC) es un proyecto gestionado por la Computing Research Association (CRA) y patrocinado por la National Science Foundation (NSF). El presente informe ha sido escrito por los organizadores del taller y no refleja necesariamente la opinión de CRA, CCC o NSF. La responsabilidad del informe recae enteramente en los autores.

Los organizadores del taller fueron Henrik I Christensen, Ken Goldberg, Vijay Kumar y Jeff Trinkle. El taller contó con una amplia participación de la academia y la industria, como se muestra en la lista de participantes a continuación:

Tom Batzinger GE	Ken Goldberg UC Berkeley	Todd Murphey Colorado
Kostas Bekris UNReno	Tom Henderson Utah	Richard Alan Peters Vanderbilt
Karl Bohringer <small>universidad</small>	William Joyner Investigación de semiconductores Corporación	Stuart Shepard KUKA
Joe Bordogna Upenn	Lydia Kavarak arroz	Sanjiv Singh UMC
Gary Bradski Garaje de sauce	Clint Kelly Georgia Tech (antiguo SAIC)	Larry dulce C&S Tiendas Integrales
Oliver Brock <small>Universidad de Massachusetts</small>	alonzo kelly UMC	Jeff Trinkle RPI
Jeff Burnstein RIA	Vijay Kumar Upenn	Jason Tsai FANUC
Thomas Fuhlbrigge ABB, Inc.	Dinesh Manocha UNC	James Wells GM
Henrik Christensen <small>Tecnología de Georgia</small>	Andres McCallum <small>Universidad de Massachusetts</small>	Peter Worman Sistemas Kiva
Roger Eastman Loyola	Peter Mostermann Matemáticas	Tom Yorio Corning
Aaron Edsinger meca	Elena Mesina NIST	Mingjun Zhang UTK
Erica Fuchs UMC		



## Capítulo 2

# Una hoja de ruta de investigación para la medicina y Robótica sanitaria

## Resumen ejecutivo

### Motivación y alcance

Varios impulsores sociales importantes para mejorar el acceso, la asequibilidad, la calidad y la personalización de la atención médica que pueden abordarse mediante la tecnología robótica. Los procedimientos médicos existentes se pueden mejorar y desarrollar otros nuevos, para que sean menos invasivos y produzcan menos efectos secundarios, lo que resultará en tiempos de recuperación más rápidos y una mayor productividad de los trabajadores, mejorando sustancialmente las relaciones riesgo-beneficio y costo-beneficio. La robótica médica ya es un gran éxito en varias áreas de la cirugía, incluidos los procedimientos de cirugía cardíaca y de próstata. Los robots también se utilizan para rehabilitación y en procedimientos inteligentes para ayudar a las personas a recuperar la función perdida. Los métodos de telemedicina y robótica de asistencia están abordando la prestación de atención médica en lugares inaccesibles, que van desde áreas rurales que carecen de experiencia especializada hasta áreas posteriores a desastres y campos de batalla. Los esfuerzos de robótica de asistencia social están desarrollando tecnologías domésticas asequibles para monitorear, entrenar y motivar ejercicios tanto cognitivos como físicos que aborden una variedad de necesidades, desde la prevención hasta la rehabilitación y la promoción de la reintegración en la sociedad. Dado que la población que envejece es un grupo demográfico dominante, se están desarrollando tecnologías robóticas para promover el envejecimiento en el lugar (es decir, en el hogar), retrasar la aparición de la demencia y brindar compañía para mitigar el aislamiento y la depresión. Además, los métodos robóticos de detección y modelado de actividad tienen el potencial de desempeñar un papel clave en la mejora de la detección temprana, la evaluación continua y la intervención y terapia personalizadas, efectivas y asequibles.

Todas las actividades anteriores tendrán el efecto de mantener y mejorar la productividad de la fuerza laboral y aumentar su tamaño, y permitir que las personas con discapacidad, cuyo número va en aumento, regresen (regresen) a la fuerza laboral. Hoy en día, Estados Unidos es líder en cirugía asistida por robot y robótica de asistencia social para una calidad de vida continua dirigida a poblaciones con necesidades especiales y personas mayores. Sin embargo, otros países se están convirtiendo rápidamente en sus seguidores, pues ya han reconocido tanto la necesidad como la promesa de dichas tecnologías.

## Participantes

Los participantes del taller estuvieron formados por expertos en robótica quirúrgica, prótesis, implantes, robótica de rehabilitación y robótica de asistencia social, así como representantes de la industria, desde grandes corporaciones hasta nuevas empresas, y representantes de la comunidad de proveedores de seguros médicos. Todos los participantes contribuyeron con conocimientos de sus comunidades y áreas de especialización; Se identificaron muchos intereses y desafíos comunes, que sirvieron de base para el esfuerzo de la hoja de ruta.

## Hallazgos del taller

El espectro de nichos de sistemas robóticos en medicina y salud abarca una amplia gama de entornos (desde el quirófano hasta la sala familiar), poblaciones de usuarios (desde los muy jóvenes hasta los muy mayores, desde la intimidad hasta las personas sin discapacidad, desde los típicamente desarrollados para personas con discapacidades físicas y/o cognitivas) y modalidades de interacción (desde cirugía práctica hasta entrenamiento de rehabilitación sin intervención). Los desafíos técnicos aumentan con la complejidad del entorno, la tarea y la (dis)capacidad del usuario. Se identificaron los siguientes dominios de problemas como los de mayor impacto previsto: cirugía e intervención; reemplazo de función disminuida/perdida; recuperación y rehabilitación; terapia de comportamiento; atención personalizada para poblaciones con necesidades especiales; y promoción del bienestar y la salud. Esos dominios de problemas involucraron el siguiente conjunto de desafíos tecnológicos y de investigación: interacción e interfaces intuitivas entre humanos y robots; comprensión automatizada del comportamiento humano; comprensión automatizada del estado emocional y fisiológico; Adaptación a largo plazo a las necesidades cambiantes del usuario; diagnóstico y evaluación cuantitativa; orientación apropiada al contexto; intervención guiada por imágenes; manipulación con gran destreza a cualquier escala; adquisición automatizada de datos de salud basada en sensores; y comportamiento seguro del robot. Además, se identificaron problemas clave de implementación de tecnología, entre ellos: operación confiable y continua en entornos humanos; privacidad, seguridad, interoperabilidad, aceptabilidad y confianza. La falta de financiación para proyectos integradores interdisciplinarios que reúnan experiencia en ingeniería, salud (y negocios) y desarrollen y evalúen sistemas completos en estudios con seres humanos se identificó como la causa de la falta de masa crítica de innovaciones tecnológicas nuevas, probadas y desplegadas. , productos y negocios para crear una industria.

# 1. Introducción

## 1.1. Definición del campo/dominio

Los robots se han convertido en una rutina en el mundo de la fabricación y otros trabajos repetitivos. Mientras que los robots industriales se desarrollaron principalmente para automatizar tareas sucias, aburridas y peligrosas, los robots médicos y de salud están diseñados para entornos y tareas completamente diferentes: aquellas que implican interacción directa con usuarios humanos, en el quirófano, el centro de rehabilitación y la familia. .habitación.

La robótica ya está empezando a afectar a la asistencia sanitaria. Se están utilizando sistemas telerobóticos como el Sistema Quirúrgico da Vinci para realizar cirugías, lo que da como resultado tiempos de recuperación más cortos y resultados más confiables en algunos procedimientos. El uso de la robótica como parte de un sistema quirúrgico integrado por computadora permite intervenciones médicas precisas y específicas. Se ha planteado la hipótesis de que la cirugía y la radiología intervencionista se transformarán mediante la integración de las computadoras y la robótica de la misma manera que la fabricación fue revolucionada por la automatización hace varias décadas. Los dispositivos hápticos, una forma de robótica, ya se utilizan en simulaciones para formar al personal médico.

Los sistemas robóticos como MIT-Manus (comercialmente, InMotion) están brindando terapia física y ocupacional con éxito. Los robots permiten una mayor intensidad de tratamiento que se adapta continuamente a las necesidades del paciente. Ya han demostrado ser más eficaces que los enfoques convencionales, especialmente para ayudar a la recuperación después de un accidente cerebrovascular, la principal causa de discapacidad permanente en Estados Unidos. El potencial futuro de los robots en convalecencia y rehabilitación es aún mayor. Los experimentos también han demostrado que los sistemas robóticos pueden proporcionar terapia de supervisión, entrenamiento y motivación que complementan la atención humana con poca o ninguna supervisión por parte de terapeutas humanos, y pueden continuar la terapia a largo plazo en el hogar después de la hospitalización. Estos sistemas también tienen potencial como herramientas de intervención y terapéuticas para trastornos del comportamiento, incluidos trastornos tan generalizados como el trastorno del espectro autista, el TDAH y otros que prevalecen entre los niños de hoy.

La tecnología robótica también desempeña un papel en el aumento de la investigación básica sobre la salud humana. La capacidad de crear un sistema robótico que imite la biología es una forma de estudiar y probar cómo funcionan el cuerpo y el cerebro humanos. Además, los robots se pueden utilizar para adquirir datos de sistemas biológicos con una precisión sin precedentes, lo que nos permite obtener conocimientos cuantitativos sobre el comportamiento físico y social.

El espectro de nichos de los sistemas robóticos en medicina y salud abarca así una amplia gama de entornos (desde el quirófano hasta la sala familiar), poblaciones de usuarios (desde los más jóvenes hasta los más mayores, desde los enfermos hasta los sanos, desde los desarrollados típicamente para personas con discapacidades físicas y/o cognitivas) y modalidades de interacción (desde cirugía práctica hasta entrenamiento de rehabilitación no intervencionista).

Los avances tecnológicos en robótica tienen un claro potencial para estimular el desarrollo de nuevos tratamientos para una amplia variedad de enfermedades y trastornos, para mejorar tanto el nivel como la accesibilidad de la atención, y para mejorar los resultados de salud de los pacientes.

## 1.2. Impulsores sociales

Existen numerosos impulsores sociales para mejorar la atención médica que pueden abordarse mediante la tecnología robótica. Estos impulsores se dividen, en términos generales, en dos categorías: ampliar el acceso a la atención médica y mejorar la prevención y los resultados para los pacientes.

Los procedimientos médicos existentes se pueden mejorar para que sean menos invasivos y produzcan menos efectos secundarios, lo que resultará en tiempos de recuperación más rápidos y una mayor productividad de los trabajadores. Los esfuerzos revolucionarios tienen como objetivo permitir el desarrollo de nuevos procedimientos y dispositivos médicos, como intervenciones a microescala y prótesis inteligentes, que mejorarían sustancialmente las relaciones riesgo-beneficio y costo-beneficio. Unos métodos más eficaces de formación de médicos reducirían el número de errores médicos. Los enfoques objetivos para la rendición de cuentas y la certificación/evaluación también contribuyen a este objetivo. Idealmente, todas estas mejoras reducirían los costos para la sociedad al reducir el impacto en las familias, los cuidadores y los empleadores. Más directamente, los costos de atención médica se reducirían debido a una mejor calidad (menos complicaciones, estancias hospitalarias más cortas y mayor eficiencia).

Se deben considerar factores poblacionales relacionados con la economía. En los Estados Unidos, más del 15% de la población no tiene seguro [Censo: Ingresos, pobreza y cobertura de seguro médico en los Estados Unidos: 2007]; muchos otros están insuficientemente asegurados. La situación impide que las personas reciban la atención sanitaria necesaria, lo que a veces provoca la pérdida de funciones o incluso de la vida, y también impide que los pacientes busquen tratamiento preventivo o temprano, lo que empeora los problemas de salud posteriores. El acceso a la atención sanitaria está más directamente relacionado con su asequibilidad. El acceso a robots de terapia físicamente interactivos promete reducir el costo de la atención de rehabilitación clínica y son el foco de un estudio en curso de la Administración de Veteranos sobre su rentabilidad. Los esfuerzos de robótica de asistencia social están trabajando hacia métodos que podrían proporcionar tecnologías domésticas asequibles para motivar y entrenar el ejercicio tanto para la prevención como para la rehabilitación. También es un ámbito prometedor para las tecnologías destinadas al cuidado de las personas mayores, hacia

promover el envejecimiento en el lugar (es decir, en casa), motivar el ejercicio cognitivo y físico para retrasar la aparición de la demencia y brindar compañía para mitigar el aislamiento y la depresión.

El acceso a la atención sanitaria también está relacionado con la ubicación. Cuando ocurren desastres y provocan lesiones humanas, la distancia y los entornos no estructurados son obstáculos para brindar atención en el lugar y retirar a los heridos del lugar. Esto se ha demostrado repetidamente tanto en desastres naturales (como terremotos y huracanes) como en desastres provocados por el hombre (como ataques terroristas). Problemas similares ocurren en el campo de batalla; Se necesita atención en el lugar de la lesión para salvar las vidas de muchos miembros del personal militar.

Algunos entornos, como el espacio, el submarino y el subterráneo (para la minería), están inherentemente alejados del personal médico. Finalmente, las poblaciones rurales pueden vivir a una distancia prohibitiva de los centros médicos que brindan atención médica especializada. La telemedicina y la robótica de asistencia pueden brindar acceso al tratamiento a personas fuera de áreas pobladas y en escenarios de desastre.

Los factores demográficos indican una necesidad creciente de mejorar el acceso y la calidad de la atención sanitaria.

Los estudios demográficos muestran que la población estadounidense atravesará un período de envejecimiento poblacional significativo durante las próximas décadas. Específicamente, Estados Unidos experimentará un aumento de aproximadamente el 40 % en el número de personas mayores para 2030. Japón verá una duplicación en el número de personas mayores de 65 años, Europa tendrá un aumento del 50 % y Estados Unidos experimentará un ~ Aumento del 40 % en el número de personas mayores de aquí a 2030. El número de personas mayores de 80 años aumentará en más del 100 % en todos los continentes. Los avances en la medicina han aumentado la esperanza de vida y esto, en combinación con la reducción de las tasas de natalidad, dará como resultado un envejecimiento de la sociedad en general. Esta tendencia demográfica tendrá un impacto significativo en la producción industrial, la vivienda, la educación continua y la atención sanitaria.

Asociado con el envejecimiento de la población está una mayor prevalencia de lesiones, trastornos y enfermedades.

Además, en todo el espectro de edades, las tendencias de salud indican un aumento de las enfermedades crónicas, como la diabetes, el autismo, la obesidad y el cáncer. La Sociedad Americana del Cáncer estima que en 2008 se identificarán en Estados Unidos 1.437.180 nuevos casos de cáncer (excluyendo las formas más comunes de cáncer de piel). Además, la probabilidad de desarrollar cánceres invasivos aumenta significativamente con la edad [ACS Cancer Facts and Figures 2008].

Estas tendencias están produciendo una necesidad creciente de atención médica personalizada. Por ejemplo, la tasa actual de nuevos accidentes cerebrovasculares es de 750.000 por año y se espera que esa cifra se duplique en las próximas dos décadas.

Los pacientes con accidente cerebrovascular deben realizar una rehabilitación intensiva para intentar recuperar la función y minimizar la discapacidad permanente. Sin embargo, ya hay escasez de fisioterapeutas adecuados y los cambios demográficos indican una enorme brecha en la atención en el futuro cercano. Mientras que el accidente cerebrovascular es más frecuente entre los pacientes mayores, la parálisis cerebral (PC) es más frecuente entre los niños. Aproximadamente 8.000 bebés son diagnosticados con parálisis cerebral cada año y hay más de 760.000 personas en los EE. UU. que presentan síntomas de parálisis cerebral. Además, el número de trastornos cognitivos y del desarrollo neurológico está aumentando, incluidos el trastorno del espectro autista, el trastorno por déficit de atención y el trastorno de hiperactividad, entre otros. Sólo las tasas de autismo se han cuadruplicado en el último cuarto de siglo, y hoy en día uno de cada 150 niños es diagnosticado con este déficit. Los mejores resultados de la detección y el diagnóstico tempranos, el seguimiento transparente y la evaluación continua de la salud conducirán a mayores ahorros de costos, al igual que la intervención y la terapia efectivas.

Estos factores también compensarán la reducción del tamaño de la fuerza laboral de atención médica, mientras que la tecnología asequible y accesible facilitará el bienestar y la atención médica personalizada y en el hogar.

Por lo tanto, una mayor independencia a lo largo de la vida se convierte en un motor social clave. Incluye aumentar la capacidad de envejecer en el lugar (es decir, permitir que las personas mayores permanezcan en casa por más tiempo, ser más felices y saludables), mejorar la movilidad, reducir el aislamiento y la depresión en todas las edades (lo que a su vez afecta la productividad, los costos de salud y el bienestar familiar). ser). Mejorar la atención y empoderar a quien la recibe también facilita brindar independencia a los cuidadores, que están cada vez más empleados y dicha atención es cada vez más informal porque la economía de la atención médica a domicilio es inasequible. La educación sanitaria y la alfabetización permanente facilitarían la prevención y podrían reforzarse mediante una mayor seguridad y seguimiento para evitar errores.

medicamentos, garantizar la constancia en la toma de medicamentos, controlar caídas, falta de actividad y otros signos de deterioro.

Todo lo anterior tiene el efecto de mantener y mejorar la productividad de la fuerza laboral y aumentar su tamaño. Con la disminución de los fondos disponibles para la seguridad social y la jubilación, la gente trabaja más tiempo. Permitir que las personas con discapacidad, cuyo número va en aumento, se incorporen a la fuerza laboral (y contribuyan a la seguridad social) también compensaría la reducción actual de la mano de obra disponible.

Finalmente, mantener el liderazgo tecnológico en el amplio ámbito de la atención médica es un objetivo clave, dado el tamaño de la población estadounidense y su grupo demográfico por edades.

## 2. Hallazgos Estratégicos

### 2.1. Robótica Quirúrgica e Intervencionista

El desarrollo de robots quirúrgicos está motivado por el deseo de:

Mejorar la eficacia de un procedimiento acoplando la información a la acción en el proceso operativo.  
habitación o suite de intervención, y

trascender las limitaciones físicas humanas al realizar cirugías y otras intervenciones  
procedimientos, sin dejar de permitir el control humano sobre el procedimiento.

Dos décadas después del primer procedimiento quirúrgico robótico del que se informó, los robots quirúrgicos ahora se utilizan ampliamente en el quirófano o en la sala de intervención. Los robots quirúrgicos están empezando a darse cuenta de su potencial en términos de precisión y visualización mejoradas, además de permitir nuevos procedimientos.

Los robots actuales utilizados en cirugía están bajo el control directo de un cirujano, a menudo en un escenario de teleoperación en el que un operador humano manipula un dispositivo de entrada maestro y el robot del lado del paciente sigue la entrada. A diferencia de la cirugía mínimamente invasiva tradicional, los robots permiten al cirujano tener destreza dentro del cuerpo, reducir los movimientos del operador desde dimensiones humanas normales a distancias muy pequeñas y proporcionar una conexión muy intuitiva entre el operador y las puntas del instrumento. El cirujano puede cortar, cauterizar y suturar con una precisión igual o mejor que la disponible anteriormente sólo durante la cirugía abierta muy invasiva. Una estación de trabajo quirúrgica completa contiene dispositivos robóticos y dispositivos de imágenes en tiempo real para visualizar el campo operatorio durante el curso de la cirugía. La próxima generación de estaciones de trabajo quirúrgicas proporcionará una amplia variedad de mejoras físicas y informáticas, como zonas "no-fly" alrededor de estructuras anatómicas delicadas, pantallas integradas que pueden colocar grandes cantidades de datos relevantes en el campo de visión del cirujano y reconocimiento de datos quirúrgicos. movimientos y estado del paciente para evaluar el rendimiento y predecir resultados de salud.

Si se dispone de la información correcta, muchos procedimientos médicos pueden planificarse con anticipación y ejecutarse de manera razonablemente predecible, con el ser humano ejerciendo principalmente control de supervisión sobre el robot. Por analogía con los sistemas de fabricación industrial, este modelo a menudo se denomina "CAD/CAM quirúrgico" (diseño asistido por computadora y fabricación asistida por computadora). Los ejemplos incluyen la preparación de hueso para reconstrucciones de articulaciones en cirugía ortopédica y la colocación de agujas en objetivos en radiología intervencionista. En estos casos, el nivel de "automatización" puede variar, dependiendo de la tarea y de la ventaja relativa que se desea obtener. Por ejemplo, aunque un robot es capaz de insertar fácilmente

introducir una aguja en un paciente, actualmente es más común que el robot coloque una guía de aguja y que el radiólogo intervencionista empuje la aguja a través de la guía. A medida que mejoren las imágenes, el modelado de tejidos y la tecnología de dirección de agujas, es probable que los sistemas futuros se integren más y coloquen activamente agujas y dispositivos terapéuticos a través de caminos que no se pueden lograr simplemente apuntando con una guía de aguja. En estos casos, el humano identificará el objetivo, planificará o aprobará la ruta propuesta y supervisará al robot mientras dirige la aguja hacia el objetivo.

## 2.2. Reemplazo robótico de función disminuida o perdida

Los dispositivos ortopédicos y protésicos se usan para aumentar la funcionalidad o la comodidad al ayudar físicamente a una extremidad con movimiento o control limitado, o al reemplazar una extremidad perdida o amputada. Estos dispositivos incorporan cada vez más funciones robóticas e integración neuronal.

Las ortesis protegen, sostienen o mejoran la función de varias partes del cuerpo, generalmente el tobillo, el pie, la rodilla y la columna. A diferencia de los dispositivos robóticos, las ortesis tradicionales son ajustadas por expertos y no pueden modificar automáticamente el nivel o tipo de asistencia a medida que el paciente crece y sus capacidades cambian. Las ortesis robóticas suelen estar diseñadas en forma de exoesqueleto que envuelve la parte del cuerpo en cuestión. Deben permitir el libre movimiento de las extremidades y al mismo tiempo proporcionar el apoyo necesario.

La mayoría de los exoesqueletos robóticos existentes son dispositivos de investigación que se centran en aplicaciones militares (por ejemplo, para permitir a los soldados llevar una carga muy pesada sobre sus espaldas mientras corren) y rehabilitación en la clínica. Sin embargo, estos sistemas aún no son lo suficientemente económicos ni fiables para que los pacientes los utilicen como ortesis.

Una prótesis es una extensión artificial que reemplaza la funcionalidad de una parte del cuerpo (generalmente perdida por una lesión o defecto congénito) fusionando dispositivos mecánicos con músculos, esqueletos y sistemas nerviosos humanos.

Los dispositivos protésicos comerciales existentes tienen una capacidad muy limitada (normalmente sólo permiten abrir/cierre de una pinza) porque se les indica que se muevan de forma puramente mecánica o mediante electromiografía (EMG), que es el registro de la actividad eléctrica muscular en una parte intacta del cuerpo). Los dispositivos protésicos robóticos tienen como objetivo emular más completamente la extremidad faltante u otra parte del cuerpo mediante la replicación de muchas articulaciones y segmentos de extremidades (como los 22 grados de libertad de la mano humana) y una integración neuronal perfecta que proporciona un control intuitivo de la extremidad, así como retroalimentación táctil al usuario.

En los últimos años se han visto grandes avances en tecnologías fundamentales y neurociencia que conducirán a estas prótesis avanzadas. Se necesita más investigación en robótica para mejorar enormemente la funcionalidad y reducir los costos de las prótesis.

## 2.3. Recuperación y rehabilitación asistidas por robots

Un paciente que sufre lesiones o enfermedades neuromusculares, como las que se producen después de un accidente cerebrovascular, a menudo se beneficia de la neurorrehabilitación. Este proceso explota la plasticidad dependiente del uso del sistema neuromuscular humano, en el que el uso altera las propiedades de las neuronas y los músculos, incluido el patrón de su conectividad y, por tanto, su función. La terapia sensoriomotora, en la que un paciente realiza movimientos de las extremidades superiores o inferiores asistidos (o resistentes) físicamente por un terapeuta humano y/o un robot, ayuda a las personas a volver a aprender a moverse. Este proceso requiere mucho tiempo y trabajo, pero genera enormes dividendos en términos de costos de atención médica para los pacientes y retorno al trabajo productivo. Como alternativa a la terapia exclusivamente humana, un robot tiene varias ventajas clave para la intervención:

después de la configuración, el robot puede proporcionar una terapia constante, prolongada y personalizada sin cansarse;

Al utilizar sensores, el robot puede adquirir datos para proporcionar una cuantificación objetiva de la recuperación; y

- el robot puede implementar ejercicios terapéuticos que no son posibles para un terapeuta humano.

Ya existen resultados clínicos significativos del uso de robots para volver a entrenar las capacidades de movimiento de las extremidades superiores e inferiores de personas que han sufrido lesiones neurológicas, como un accidente cerebrovascular. Estos robots de rehabilitación proporcionan muchas formas diferentes de entrada

mecánica, como ayudar, resistir, perturbar y estirar, según la respuesta del sujeto en tiempo real. Por ejemplo, el robot de rehabilitación MIT-Manus disponible comercialmente mostró una mejor recuperación de pacientes con accidente cerebrovascular agudo y crónico. Otra implicación interesante de la terapia sensoriomotora con robots es que pueden ayudar a los neurocientíficos a mejorar su comprensión general de la función cerebral. A través del conocimiento de las perturbaciones del paciente basadas en robots y la cuantificación de la respuesta de los pacientes con daño en áreas particulares del cerebro, los robots pueden realizar registros de estímulo-respuesta sin precedentes. Para optimizar las terapias de rehabilitación automatizadas, se deben desarrollar robots y experimentos para dilucidar la relación entre las fuerzas mecánicas externas y la plasticidad neuronal. La comprensión de estas relaciones también brinda a los neurocientíficos y neurólogos una idea de la función cerebral, que puede contribuir a la investigación básica en esos campos.

Además de proporcionar asistencia mecánica/física en la rehabilitación, los robots también pueden proporcionar motivación y entrenamiento personalizados. La robótica de asistencia social se centra en el uso de datos sensoriales de sensores portátiles, cámaras u otros medios para percibir la actividad del usuario para proporcionar al robot información sobre el usuario que le permita a la máquina alentar y motivar adecuadamente los ejercicios de recuperación sostenida. Los primeros trabajos ya han demostrado estos robots de asistencia social en el campo de la rehabilitación de accidentes cerebrovasculares, y se están desarrollando para otros dominios de neurorehabilitación, incluidas las lesiones cerebrales traumáticas que suelen sufrir los veteranos de guerra recientes y aquellos involucrados en accidentes de tráfico graves. Además de la rehabilitación a largo plazo, estos regímenes también tienen el potencial de afectar los resultados de salud en convalecencias a corto plazo donde se prescriben regímenes intensivos. Por ejemplo, se demostró un sistema temprano en la sala cardíaca, animando y entrenando a los pacientes a realizar ejercicios de espirometría diez veces por hora. Dichos sistemas pueden servir como multiplicadores de fuerza en la prestación de servicios de salud, brindando más atención a más pacientes, pero también como un medio para brindar medicina y atención personalizadas, brindando una atención más personalizada a todos los pacientes.

**Un robot puede implementar ejercicios terapéuticos que un terapeuta humano no podría realizar.**

---

## 2.4. Terapia de comportamiento

La convalecencia, la rehabilitación y el tratamiento de los trastornos cognitivos, sociales y físicos de por vida requieren una terapia conductual continua, que consiste en ejercicios físicos y/o cognitivos que deben mantenerse con la frecuencia y corrección adecuadas. En todos los casos, se ha demostrado que la intensidad de la práctica y la autoeficacia son las claves para la recuperación y minimización de la discapacidad. Sin embargo, debido a las tendencias demográficas de rápido crecimiento de muchas de las poblaciones afectadas (p. ej., autismo, TDAH, accidente cerebrovascular, TBI, etc., como se analiza en la Sección 1.2), la atención médica disponible necesaria para brindar supervisión y entrenamiento para tal comportamiento La terapia ya es deficiente y se reconoce que está en constante declive.

La robótica de asistencia social (SAR) es un campo comparativamente nuevo de la robótica que se centra en el desarrollo de robots destinados a abordar precisamente esta creciente necesidad. SAR está desarrollando sistemas capaces de ayudar a los usuarios a través de la interacción social en lugar de la física. La encarnación física del robot es el núcleo de la eficacia asistencial del SAR, ya que aprovecha la tendencia inherentemente humana a participar en un comportamiento social realista (pero no necesariamente humano o animal). La gente atribuye fácilmente intención, personalidad y emoción incluso a los robots más simples, desde los juguetes LEGO hasta las aspiradoras iRobot Roomba. SAR utiliza este compromiso para el desarrollo de robots socialmente interactivos capaces de monitorear, motivar, alentar y sostener las actividades de los usuarios y mejorar el desempeño humano.

Por lo tanto, el SAR tiene el potencial de mejorar la calidad de vida de grandes poblaciones de usuarios, incluidos los

ancianos, personas con discapacidades cognitivas, aquellos que se están rehabilitando de un derrame cerebral y otras discapacidades neuromotoras, y niños con trastornos del desarrollo socioeconómico como el autismo. Los robots, entonces, pueden ayudar a mejorar la función de una amplia variedad de personas, y pueden hacerlo no sólo funcionalmente sino también socialmente, adoptando y aumentando la conexión emocional entre humanos y robots.

La interacción persona-robot (HRI) para SAR es un área de investigación en crecimiento en la intersección de la ingeniería, las ciencias de la salud, la psicología, las ciencias sociales y las ciencias cognitivas. Un robot de asistencia social eficaz debe comprender e interactuar con su entorno, exhibir un comportamiento social, centrar su atención y comunicación en el usuario, mantener el compromiso con el usuario y lograr objetivos de asistencia específicos.

El robot puede hacer todo esto a través de una interacción social en lugar de física, y de una manera segura, ética y eficaz para el usuario potencialmente vulnerable. Se ha demostrado que los robots de asistencia social son prometedores como herramienta terapéutica para niños, ancianos, pacientes con accidentes cerebrovasculares y otras poblaciones con necesidades especiales que requieren atención personalizada.

## 2.5. Atención personalizada para poblaciones con necesidades especiales

Debido al crecimiento de las poblaciones con necesidades especiales, incluidas aquellas con trastornos físicos, sociales y/o cognitivos, que pueden ser de desarrollo, de aparición temprana, relacionados con la edad o ocurrir en cualquier etapa de la vida, existe una necesidad claramente creciente de atención personalizada para personas con necesidades especiales. Algunas de las discapacidades generalizadas son congénitas (desde el nacimiento), como la parálisis cerebral y el trastorno del espectro autista, mientras que otras pueden ocurrir en cualquier momento de la vida (lesión cerebral traumática, accidente cerebrovascular), y otras ocurren más tarde en la vida pero persisten por más tiempo. La esperanza de vida prolongada (enfermedad de Parkinson, demencia y enfermedad de Alzheimer). En todos los casos, estas afecciones duran toda la vida y requieren asistencia cognitiva y/o física a largo plazo asociada con recursos y costos significativos.

Los sistemas de asistencia física y social de los tipos descritos anteriormente tienen el poder de impactar directamente la capacidad del usuario para obtener, recuperar y retener la independencia y estar integrado al máximo en la sociedad. Los más importantes reconocidos hoy incluyen la movilidad, la facilitación de la independencia y el envejecimiento en el lugar.

Ayudas para la movilidad física, que van desde dispositivos para personas con discapacidad visual hasta personas con discapacidad física, y desde sillas de ruedas inteligentes de alta gama hasta bastones autoestabilizadores más simples, que amplían el acceso a bienes y servicios, disminuyen el aislamiento, la probabilidad de depresión y la necesidad de atención médica administrada. . Las tecnologías robóticas prometen ayudas a la movilidad que pueden proporcionar niveles ajustables de autonomía para el usuario, de modo que uno pueda elegir cuánto control ceder, una cuestión clave para la comunidad de discapacitados. Sillas de ruedas inteligentes, bastones guía y andadores interactivos son sólo algunas áreas ilustrativas que se están desarrollando.

Con el rápido envejecimiento de la población, la necesidad de dispositivos que permitan a las personas con limitaciones físicas y discapacidades seguir viviendo de forma independiente en sus propios hogares está aumentando. Esta necesidad se ve aumentada por las necesidades de la población más pequeña pero también creciente de discapacitados físicos, incluidos los veteranos de guerra. Los sistemas complejos para facilitar la independencia, como las máquinas que ayudan en la manipulación y/o la movilidad de las personas con discapacidades graves, y aquellas que ayudan en tareas complejas como el aseo personal y el acostarse y levantarse de la cama, aún se encuentran en las primeras etapas de desarrollo, pero muestran resultados. promesa de un rápido progreso. Al mismo tiempo, la investigación en robótica móvil está avanzando en el desarrollo de plataformas móviles de manipulación, hacia máquinas capaces de recoger y entregar artículos del hogar, abrir puertas y, en general, facilitar al usuario la posibilidad de vivir de forma independiente en su propio hogar. La demora (o eliminación, si es posible) de la necesidad de trasladar a una persona a un centro de atención administrada disminuye significativamente el costo y la carga para la persona, la familia y los proveedores de atención médica. También disminuye en gran medida la probabilidad de aislamiento, depresión y reducción de la esperanza de vida.

Además de la ayuda física/mecánica, las poblaciones con necesidades especiales se beneficiarán significativamente de los avances en la robótica de asistencia social (analizados en la sección anterior), que brindan asistencia personalizada.

seguimiento, compañerismo y motivación para ejercicios cognitivos y físicos asociados con la promoción de la salud a lo largo de la vida.

## 2.6. Bienestar/Promoción de la Salud

Mejorar la prevención y los resultados para los pacientes son objetivos amplios y fundamentales de la atención sanitaria. Formas mejores, más efectivas y accesibles, así como personalizadas, de alentar a las personas a comer bien, hacer ejercicio y mantener la salud mental disminuirían significativamente muchos problemas de salud urgentes y crónicos.

A pesar de su importancia fundamental, la promoción de la salud recibe menos atención y muchos menos recursos que la intervención sanitaria. La financiación de la investigación está justificadamente dirigida a esfuerzos para buscar causas y curas para enfermedades y condiciones, más que a su prevención, con excepción de la investigación de vacunas en subáreas específicas (por ejemplo, cáncer, SIDA). Sin embargo, la investigación orientada a la prevención y sus resultados tienen el potencial de tener un impacto más significativo en las tendencias de salud y los importantes costos asociados para la sociedad. Las compañías de seguros están particularmente motivadas para promover la prevención e invertir en tecnologías que lo hagan. Si bien no están dispuestos a apoyar la investigación básica, sí están dispuestos a apoyar ensayos de evaluación de nuevas tecnologías orientadas a la prevención y la promoción de la salud.

Se están desarrollando tecnologías robóticas para abordar la promoción del bienestar. Muchos de los avances descritos anteriormente también tienen extensiones y aplicaciones para el bienestar. Específicamente, los sistemas robóticos que promueven, personalizan y entrenan el ejercicio, ya sea a través de interacción social y/o física, tienen grandes nichos de aplicación potenciales, desde jóvenes hasta personas mayores, desde personas sin discapacidad hasta discapacitadas y desde aficionados hasta atletas entrenados. Los dispositivos portátiles que monitorean las respuestas fisiológicas e interactúan con sistemas robóticos e informáticos también tienen el potencial de promover regímenes de bienestar personalizados y facilitar la detección temprana y la evaluación continua de los trastornos. En este contexto, la robótica está proporcionando tecnologías habilitadoras que interoperan con los sistemas existentes (por ejemplo, computadoras portátiles y de escritorio, dispositivos portátiles, sensores domésticos, etc.) para aprovechar los avances en todos los campos y producir una amplia gama de tecnologías utilizables para mejorar la calidad de vida (QoL).

## 3. Desafíos y capacidades clave

### 3.1. Escenarios ejemplares motivadores

#### 3.1.1. Cirugía e Intervención

Una imagen preoperatoria o un análisis de sangre indican que un paciente puede tener cáncer en un órgano interno. Al paciente se le realiza una Imagen de Resonancia Magnética (MRI), a partir de la cual se confirma la existencia de tejido canceroso. En función de la extensión espacial del cáncer identificado mediante el procesamiento de imágenes y modelos de tejido, se determina un plan quirúrgico óptimo. Un cirujano utiliza un robot teleoperado mínimamente invasivo compatible con resonancia magnética para extirpar los tejidos cancerosos. El robot está seguro de que la cirugía se puede realizar a través de un orificio natural, por lo que no se realizan cortes externos en el paciente. Durante el procedimiento, el cirujano ve imágenes en tiempo real, se guía por el plan quirúrgico y recibe retroalimentación háptica.

para permitir la palpación y la aplicación adecuada de fuerzas al tejido. El tejido canceroso se extirpa con muy poco margen y el paciente se recupera rápidamente con poco dolor y sin cicatrices.

### 3.1.2. Reemplazo de función disminuida/perdida

Un joven pierde un miembro superior en un accidente. Se fabrica a medida del paciente una prótesis robótica con una mano diestra que replica la funcionalidad de la extremidad perdida mediante imágenes médicas, creación rápida de prototipos y ensamblaje robótico. La prótesis se controla perfectamente mediante los pensamientos del paciente, utilizando una interfaz cerebro-máquina mínima o no invasiva. El paciente puede controlar todas las articulaciones de su mano artificial y recibe retroalimentación sensorial multimodal (p. ej., fuerza, textura, temperatura), lo que le permite interactuar de forma natural con el entorno. De particular importancia para el usuario es ser consciente del movimiento de la extremidad incluso en la oscuridad, sentir el calor de la mano de un ser querido y poder realizar tareas de manipulación complejas, como atarse los zapatos.

### 3.1.3. Recuperación y rehabilitación

Un paciente todavía no puede realizar las tareas de la vida diaria años después de un derrame cerebral y comienza una terapia asistida por robot en la clínica. El dispositivo robótico aplica con precisión las fuerzas necesarias para ayudar al paciente a realizar movimientos apropiados de las extremidades, incluso a veces resistiendo el movimiento del paciente para ayudarlo a aprender a realizar movimientos correctivos. Los datos se registran durante toda la terapia, lo que permite que tanto el terapeuta como el sistema robótico recomienden estrategias óptimas para la terapia, actualizadas constantemente con el desempeño cambiante del paciente. Este proceso de rehabilitación dirigido y preciso brinda al paciente un control de las extremidades más estable, repetible y natural. Al mismo tiempo, los neurocientíficos y neurólogos reciben datos que les ayudan a comprender los mecanismos del déficit. Fuera de la clínica, una enfermera robot doméstica/

El entrenador continúa trabajando con el paciente para motivarlo y proyectar autoridad y competencia, pero conserva la autonomía del usuario mientras lo motiva a continuar con los ejercicios. Esto acorta la convalecencia y ayuda al usuario a recuperarse.

### 3.1.4. Terapia de comportamiento

Un robot trabaja con un niño con trastornos del neurodesarrollo (p. ej., trastorno del espectro autista y otros) para brindarle entrenamiento personalizado para la comunicación y la integración social en el hogar. El robot interactúa con el niño de forma social, promoviendo comportamientos sociales, como turnarse en el juego, atención conjunta, señalar y hacer referencias sociales. Luego sirve como catalizador social para jugar con otros niños, primero en el hogar y luego en el comedor de la escuela y, finalmente, en el patio de recreo. En todo momento, el robot recopila datos cuantitativos sobre el comportamiento del usuario/paciente que pueden ser analizados tanto automáticamente como por los proveedores de atención médica para una evaluación continua y una entrega personalizada de tratamientos/intervenciones.

### 3.1.5. Atención personalizada para poblaciones con necesidades especiales

Se entregan robots personalizados a personas mayores y con discapacidades físicas y/o cognitivas (por ejemplo, Alzheimer/demencia, lesión cerebral traumática). Son capaces de monitorear la actividad del usuario (desde tareas específicas hasta la vida diaria en general) y brindar entrenamiento, motivación y aliento, para minimizar el aislamiento y facilitar la actividad y la integración en la sociedad. Los robots pueden enviar información inalámbrica para convocar a los cuidadores según sea necesario, y pueden usarse para evaluar y buscar continuamente señales de advertencia de trastornos o condiciones que empeoran (disminución del sentido del equilibrio, disminución de la interacción social, disminución de las vocalizaciones, falta de actividad física, mayor aislamiento de la familia). /amigos, etc.) que desencadenan la necesidad de una intervención temprana.

### 3.1.6. Bienestar y promoción de la salud.

Sistemas personalizados asequibles y accesibles que monitorean, fomentan y motivan hábitos de salud deseables, incluyendo una dieta adecuada, ejercicios, controles de salud, relajación, conexión activa e interacción social con familiares y amigos, cuidado de mascotas, etc. Estos sistemas robóticos se compran tan fácil y rápidamente como las computadoras personales actuales, y se configuran fácilmente para el usuario y se hacen interoperables con otros recursos informáticos y sensoriales del entorno del usuario. Por ejemplo, robots que monitorean la cantidad de actividad física de un usuario diabético con sobrepeso para promover una mayor actividad física, y requieren informes de prácticas dietéticas y controles de salud, compartiendo actualizaciones de información apropiadas con la familia y el proveedor de atención médica, así como con el seguro. empresa cuyas tarifas se ajustan favorablemente en función de la adherencia a un estilo de vida saludable y preventivo.

## 3.2. Hoja de ruta de capacidades

Para abordar los desafíos de atención médica señalados en las Secciones 1 y 2 y lograr los emocionantes escenarios descritos inmediatamente arriba en la Sección 3.1, hemos desarrollado una lista de capacidades importantes que el sistema robótico debe tener para una integración ideal en la medicina y la atención médica. Estas capacidades, a su vez, motivan la investigación de las tecnologías descritas en la Sección 4.

### 3.2.1. Interacciones e interfaces físicas intuitivas entre humanos y robots

El uso de la robótica en medicina implica inherentemente la interacción física entre cuidadores, pacientes y robots, en todas las combinaciones. Desarrollar interfaces físicas intuitivas entre humanos y robots requiere todos los elementos clásicos de un sistema robótico: detección, percepción y acción. Se requiere una gran variedad de tareas de detección y percepción, incluido registrar los movimientos y fuerzas de un cirujano para inferir su intención, determinar los parámetros mecánicos del tejido humano y estimar las fuerzas entre un robot de rehabilitación y un paciente con accidente cerebrovascular en movimiento. La naturaleza recíproca de la interacción significa que el robot también deberá proporcionar información útil al operador humano, ya sea un cuidador o un paciente. Necesitamos considerar sistemas que involucren muchos sentidos humanos, los más comunes de los cuales son la visión, la háptica (fuerza y tacto) y el sonido.

Una de las principales razones por las que los sistemas que implican colaboración física entre humanos y robots son tan difíciles de diseñar bien es que, desde la perspectiva de un robot, los humanos son extremadamente inciertos. A diferencia de un entorno pasivo y estático, los humanos cambian su movimiento, fuerza y propósito inmediato de forma regular. Esto puede ser tan simple como un movimiento fisiológico (p. ej., la respiración de un paciente durante la cirugía) o tan complejo como los movimientos de la sutura de un cirujano durante la cirugía.

Durante la interacción física con un robot, el ser humano es una parte integral de un sistema de retroalimentación de circuito cerrado, intercambiando simultáneamente información y energía con el sistema robótico y, por lo tanto, no puede considerarse simplemente como una entrada del sistema externo. Además, el circuito a menudo se cierra tanto con la fuerza humana como con la retroalimentación visual, cada uno con sus propios errores y retrasos; esto puede causar inestabilidades en el sistema humano-robot. Ante estos problemas, ¿cómo garantizamos una interacción física segura, intuitiva y útil entre robots y humanos? Hay varios enfoques para resolver estos problemas, que se pueden utilizar en paralelo: modelar al ser humano con el mayor detalle posible, detectar el comportamiento físico del ser humano en una gran cantidad de dimensiones y desarrollar comportamientos robóticos que aseguren una interacción adecuada sin importar lo que ocurra. Qué. Qué hace el ser humano. Se han logrado grandes avances en estas áreas durante las últimas dos décadas, pero todavía no existen sistemas que brinden al usuario una experiencia ideal de interacción física con un robot. Los objetivos a 5, 10 y 15 años para esta capacidad se centran en

**Necesitamos considerar sistemas que involucren muchos sentidos humanos.**

---

creciente complejidad e incertidumbre de la tarea en cuestión.

- En cinco años, los robots deberían poder tener una comprensión sofisticada del ser humano deseado. Movimiento basado en sensores externos e interfaces cerebro-máquina. Esto es especialmente esencial para el diseño de prótesis y requiere un mapeo apropiado entre los pensamientos humanos y las acciones de una prótesis robótica.

En 10 años, al detectar los movimientos de un ser humano e inferir su intención, los robots deberían poder proporcionar fuerzas apropiadas para el contexto para un operador humano, como un paciente en rehabilitación que utiliza un robot para recuperar la función y la fuerza de las extremidades después de un accidente cerebrovascular. Al detectar los movimientos del ser humano e inferir la intención, el robot debe limitar la fuerza o el movimiento aplicado a niveles que sean útiles e intuitivos para el usuario.

- En 15 años, los sistemas robóticos deberían poder proporcionar el conjunto completo de retroalimentación física a un operador humano, en particular una retroalimentación háptica adecuada. Un cirujano o cuidador debería poder sentir las fuerzas, las texturas superficiales detalladas y otras propiedades físicas de un paciente remoto. El entorno debe ser completamente inmersivo y funcionar a cualquier escala.

### 3.2.2. Comprensión automatizada del comportamiento humano

Comprender la actividad y la intención del usuario son componentes necesarios de la interacción persona-máquina y, por lo tanto, de la interacción persona-robot, para poder responder de manera adecuada, oportuna y segura. Los sistemas de salud eficaces deben ser capaces de percibir su entorno y a sus usuarios. Debido a que la actividad humana es compleja e impredecible, y debido a que la percepción basada en la visión es un desafío constante en la robótica, la percepción y comprensión automatizadas del comportamiento humano requiere la integración de datos de una multitud de sensores, incluidos los del robot, los del entorno y los del entorno. desgastado por el usuario. Se está desarrollando la investigación de algoritmos para la integración de sensores multimodales en línea en tiempo real, incluida la aplicación de métodos estadísticos para el modelado de usuarios basados en datos multimodales. El reconocimiento y la clasificación de la actividad y la intención humanas son de particular interés para permitir la interacción y asistencia del usuario en tiempo real. Los sistemas HRI sólo se aceptarán si responden al usuario en un plazo que el usuario considere razonable (es decir, el sistema no puede tardar demasiado en responder ni puede responder incorrectamente con demasiada frecuencia). Los métodos actuales para la percepción multimodal han utilizado diversos medios para simplificar los difíciles problemas del reconocimiento de objetos y personas del mundo real y el reconocimiento y clasificación de actividades. Por ejemplo, se han utilizado marcadores reflectantes y de colores, códigos de barras y etiquetas de identificación por radiofrecuencia, todos los cuales requieren cierto nivel de instrumentación del medio ambiente.

Minimizar dicha instrumentación y hacerla no intrusiva es un aspecto necesario para que la tecnología sea aceptable.

Las áreas clave de progreso y promesa incluyen: (1) el uso de sensores fisiológicos como contraparte de los sensores estándar en robots y en el entorno en los que el campo se ha centrado hasta la fecha; (2) aprovechar, procesar y utilizar sensores multimodales a bordo, en el entorno y en el usuario para HRI en tiempo real; y (3) comprensión del afecto/emoción del usuario.

En 5 años, los robots deberían poder tener la capacidad de capturar el comportamiento humano instrumentado (con la ayuda de marcadores portátiles) en entornos controlados (p. ej., sesiones de fisioterapia, consultorios médicos) con estructura conocida y naturaleza esperada de las interacciones. Los algoritmos deberían poder utilizar datos inciertos y ruidosos de dichas sesiones para desarrollar modelos del usuario y la interacción.

- En 10 años, los robots deberían poder clasificar automáticamente el comportamiento humano desde niveles ligeramente usuarios instrumentados (sensores livianos), en entornos menos estructurados (por ejemplo, consultorios médicos y hogares con una estructura menos conocida), visualizan esos datos para el usuario y el proveedor de atención médica, y clasifican la actividad en ejercicios prohibidos y otras actividades para evaluación

actuación. Las técnicas de modelado en línea deberían poder clasificar la actividad observada y predecir el desempeño del usuario y las acciones futuras con niveles razonables de precisión.

En 15 años, los sistemas robóticos deberían ser capaces de detectar, clasificar, predecir y proporcionar asesoramiento a actividad humana dentro de un contexto amplio conocido (por ejemplo, ejercicio, trabajo de oficina, vestirse, etc.).

El sistema debería poder proporcionar datos visualizados intuitivamente para cada usuario, que diferirán según las necesidades del usuario (por ejemplo, el médico necesitará una evaluación detallada de la actividad motora, el cuidador la consistencia y precisión de los ejercicios, el usuario una "puntuación" de la actividad y algunos consejos útiles para mejorar, etc.).

### 3.2.3. Comprensión automatizada del estado emocional y fisiológico

La capacidad de reconocer automáticamente los estados emocionales de los usuarios para respaldar el comportamiento apropiado y personalizado del robot es fundamental para que la robótica personalizada sea efectiva, especialmente para aplicaciones relacionadas con la salud que involucran a usuarios vulnerables. El reconocimiento de emociones se ha estudiado en señales de voz y habla, datos faciales y datos fisiológicos. Dada la complejidad del problema, la comprensión, el modelado y la clasificación de las emociones se beneficiarán directamente de los avances en todas las áreas enumeradas anteriormente: reconocimiento de actividades, procesamiento de datos fisiológicos y percepción multimodal. La comprensión de las emociones requiere procesar datos multicanal del usuario y conciliar inconsistencias (por ejemplo, entre señales verbales y faciales). La incongruencia en tales señales puede confundir al receptor; De manera análoga, la percepción humana de las expresiones sintéticas de emociones multicanal (por ejemplo, en robots encarnados equipados con rostros, voces y cuerpos articulados) aún no se comprende bien y merece una investigación en profundidad para informar el diseño de sistemas basados en principios. El poder de la empatía es bien reconocido en la atención sanitaria: los médicos que son percibidos como empáticos son considerados los más competentes y tienen menos demandas. Crear empatía en sistemas sintéticos es solo uno de los desafíos de percibir y expresar emociones. Además, los primeros trabajos en robótica de asistencia social ya han demostrado que la expresión de la personalidad, relacionada con la emoción, es una herramienta poderosa para entrenar y promover el comportamiento deseado por parte de un usuario de un sistema de rehabilitación. Dado que se sabe que la personalidad tiene un impacto en los resultados de salud, la capacidad de percibirla, modelarla y expresarla, junto con las emociones asociadas, es un aspecto importante de la interacción hombre-máquina destinado a mejorar la salud y la calidad de vida humanas.

**Crear empatía en sistemas sintéticos es solo uno de los desafíos.**

---

Los datos fisiológicos, como las medidas de frustración, fatiga e interés, son invaluable para comprender el estado del usuario y permitir que los robots, y las máquinas en general, puedan ayudar al usuario y optimizar el rendimiento. Los sensores de datos fisiológicos suelen ser sensores y dispositivos portátiles que proporcionan señales fisiológicas en tiempo real (p. ej., frecuencia cardíaca, respuesta galvánica de la piel, temperatura corporal, etc.).

Estas señales son altamente individualizadas y típicamente complejas de visualizar intuitivamente y analizar de manera útil. La investigación activa en este campo está abordando métodos para extraer métricas, como la frustración y la prominencia en relación con la actividad externa, a partir de datos fisiológicos. La investigación también se centra en conectar y acceder a señales bioeléctricas con dispositivos portátiles o implantables. Con la excepción de algunos dispositivos implantables, todavía no se dispone de sensores portátiles ligeros con capacidades inalámbricas para la transmisión de datos y baterías de bajo peso. La promesa de las tecnologías sensoriales portátiles ha sido ampliamente reconocida y se están realizando avances para abordar estos problemas. La capacidad de capturar datos fisiológicos de una manera sencilla y transmitirlos a una computadora, robot o cuidador tiene un gran potencial para mejorar la evaluación de la salud, el diagnóstico, el tratamiento y la medicina personalizada. Estos datos complementan los sensores robóticos estándar (visión, láser, infrarrojos, sonar) y proporcionan datos de usuario invaluable para el modelado y la interacción inteligente entre humanos y máquinas.

- En cinco años, una variedad de dispositivos portátiles deberían interactuar de forma inalámbrica con robots de asistencia para informar el desarrollo de modelos de usuario y algoritmos de clasificación de estados y actividades. Se deben desarrollar algoritmos multimodales que puedan tomar datos visuales altamente inciertos y combinarlos con otros datos sensoriales para clasificar los estados emocionales.

En 10 años, sensores portátiles inalámbricos de menor escala y peso proporcionarán una gama de

Los datos fisiológicos deben estar disponibles como entrada en tiempo real en algoritmos que utilizan modelos poblacionales e individuales del usuario para detectar y clasificar, así como hasta cierto punto predecir el estado fisiológico del usuario. Los algoritmos multimodales deben tomar información de la visión y de los sensores portátiles para integrarse perfectamente hacia un reconocimiento confiable del estado emocional y fisiológico en tiempo real.

- En 15 años, los dispositivos inalámbricos de detección fisiológica disponibles en el mercado deberían interoperar con Sistemas de entrenamiento basados en computadoras y robots que pueden usar los datos para desarrollar y aplicar modelos de usuario en tiempo real para facilitar la biorretroalimentación y otras formas de retroalimentación al usuario y la clasificación del estado fisiológico y emocional del usuario para facilitar el robot humano sofisticado. y, de manera más general, la interacción hombre-máquina.

### 3.2.4. Adaptación a largo plazo a las necesidades cambiantes del usuario

La necesidad de adaptación y aprendizaje del sistema es especialmente evidente en los dominios de interacción entre humanos y robots.

Cada usuario tiene características, necesidades y preferencias específicas a las que se debe ajustar el sistema.

Además, esas mismas características, necesidades y preferencias pueden cambiar con el tiempo a medida que el usuario se acostumbra al sistema y a medida que cambia su estado de salud, tanto a corto plazo (convalecencia), mediano plazo (rehabilitación) como a lo largo de toda la vida. (cambios de estilo de vida, envejecimiento). Para ser aceptados, utilizables y eficaces, los sistemas robóticos que interactúan con usuarios humanos deben poder adaptarse y aprender en nuevos contextos y en escalas de tiempo ampliadas, en una variedad de entornos y contextos.

Los desafíos en el aprendizaje a largo plazo incluyen la integración de información multimodal sobre el usuario a lo largo del tiempo, a la luz de inconsistencias y cambios en el comportamiento y experiencias inesperadas. El aprendizaje automático, incluido el aprendizaje robótico, ha ido adoptando métodos estadísticos cada vez más basados en principios.

Sin embargo, el trabajo no ha abordado las complejidades de los datos inciertos del mundo real (ruidosos, incompletos e inconsistentes), datos multimodales sobre un usuario (que van desde información a nivel de señal de pruebas, sondas, electrodos y dispositivos portátiles, hasta información simbólica de gráficos, cuestionarios y entrevistas a pacientes) y datos a largo plazo (durante meses y años de tratamiento).

La capacidad de interactuar con el usuario a través de interfaces intuitivas (gestos, varitas, habla) y aprender mediante demostración e imitación han sido temas de investigación activa durante algún tiempo. Presentan un desafío novedoso para las interacciones a largo plazo en el hogar donde el sistema está sujeto al aprendizaje y la habituación del usuario, así como a efectos decrecientes de la

novedad y la paciencia. Los sistemas de aprendizaje robótico aún no se han probado en estudios verdaderamente a largo plazo (durante semanas y meses) y el aprendizaje permanente aún no es más que un concepto.

## Los sistemas robóticos que interactúan con usuarios humanos deben poder

## adaptarse y aprender.

---

Finalmente, debido a que los sistemas de aprendizaje suelen ser difíciles de evaluar y analizar, es particularmente importante que dichas tecnologías adaptativas y personalizadas estén equipadas con herramientas de visualización intuitivas del estado de su sistema, así como del estado de salud del usuario.

Teniendo en cuenta estos desafíos, un sistema robótico de atención médica adaptable y de aprendizaje ideal sería capaz de predecir cambios en el estado de salud del usuario/paciente y ajustar la prestación de sus servicios en consecuencia; ajustaría sus métodos para motivar, alentar y entrenar al usuario continuamente,

mantener su atractivo y eficacia manteniendo la participación de los usuarios a largo plazo. Un sistema de este tipo tendría métricas cuantitativas para mostrar resultados de salud positivos basados en métodos de convalecencia/intervención/terapia/prevención prescritos por profesionales de la salud.

En cinco años, los sistemas adaptativos y de aprendizaje deberían utilizar cantidades cada vez mayores de salud del mundo real. datos y demostrar que funciona con dichos datos a pesar de su naturaleza ruidosa, dinámicamente cambiante y compleja. Los modelos de usuario deben permitir que el sistema adapte su estilo de interacción con el usuario para mejorar el desempeño de las tareas del usuario dentro de un contexto particular (por ejemplo, ejercicio específico).

En 10 años, los sistemas adaptativos y de aprendizaje deberían ampliarse para funcionar con datos a largo plazo (meses y más) y datos de pacientes multimodales hacia un modelado de usuario integral de propósito más general más allá de un contexto particular (por ejemplo, desde ejercicios específicos hasta la actividad diaria general).

En 15 años, los sistemas adaptativos y de aprendizaje deberían estar disponibles como software en computadoras estándar. Facilitar el seguimiento de la atención sanitaria a domicilio y la promoción del bienestar. Tomar datos proporcionados por el usuario a lo largo del tiempo y de múltiples modalidades, así como información del proveedor de atención médica (como parte del procedimiento de pago, por ejemplo), para continuar actualizando modelos integrales del estado de salud del usuario, y visualizarlos e informarlos al usuario, su familia, y proveedores de atención médica, y utilizarlos para continuar optimizando la interacción hombre-máquina para mejorar las prácticas de salud.

### 3.2.5. Diagnóstico y evaluación cuantitativa

Los robots acoplados a sistemas de información pueden adquirir datos de pacientes de formas sin precedentes. Pueden usar sensores para registrar el estado fisiológico del paciente, involucrar al paciente en interacción física para adquirir medidas externas de salud como fuerza, interactuar con el paciente de manera social para adquirir datos de comportamiento (p. ej., mirada, gestos, atención conjunta, etc.) de forma más objetiva y repetida de lo que podría hacerlo un observador humano. Además, el robot puede conocer el historial de la condición de salud particular y su tratamiento, y recibir información mediante sensores de la interacción que ocurre entre el médico o cuidador y el paciente. El diagnóstico y la evaluación cuantitativos requieren sentir al paciente, aplicar estímulos para evaluar las respuestas y la inteligencia para utilizar los datos adquiridos para el diagnóstico y la evaluación. Cuando el diagnóstico o la evaluación son inciertos, se puede ordenar al robot que adquiera datos más apropiados. El robot debe poder interactuar de manera inteligente con el médico o cuidador para ayudarlos a realizar un diagnóstico o evaluación con conocimiento sofisticado del dominio, no necesariamente reemplazarlo. A medida que los robots facilitan el envejecimiento en el lugar (por ejemplo, en el hogar), la evaluación automatizada se vuelve más importante como medio para alertar a un cuidador, que puede no estar siempre presente, sobre posibles problemas de salud.

Muchos componentes tecnológicos relacionados con el diagnóstico y la evaluación, como los sensores microelectromecánicos de laboratorio en un chip para análisis químicos y la "ropa inteligente" que registra la frecuencia cardíaca y otros fenómenos fisiológicos, se basan en ideas en el campo de la robótica o han sido Utilizado por robots en diagnóstico y evaluación. Otros, como el uso de robots inteligentes de asistencia social para cuantificar datos de comportamiento, son completamente novedosos y presentan nuevas formas de tratar datos que, hasta la fecha, habían sido sólo cualitativos.

Es necesario mejorar cada uno de los innumerables pasos del diagnóstico/evaluación y luego combinarlos en un proceso fluido. Estos pasos incluyen: aplicar estímulos (si es necesario), adquirir datos, hacer un diagnóstico o evaluación de la salud del paciente, transmitir la información en una forma útil con el nivel de detalle apropiado a un cuidador, integrar los aportes del cuidador para revisar el diagnóstico/evaluación y realizar acciones que permitirán la recopilación de más o diferentes datos (si es necesario) para realizar un diagnóstico/evaluación mejor informado. En algunos entornos, este proceso es autónomo (es decir, se administra dentro de una sesión controlada), mientras que en otros puede ser un procedimiento más abierto (es decir, se administra en un entorno natural, como el hogar). Lograr este sofisticado proceso requiere alcanzar varios hitos importantes.

En 5 años, un robot debería ser capaz de extraer métricas relevantes, como la excitación, la frecuencia cardíaca, capacidad de movimiento, dirección de la mirada, gestos sociales, etc. en el mundo real. Se realizarían análisis fuera de línea de señales bioeléctricas y de comportamiento y se desarrollarían formas óptimas de transmitir la información al sistema robótico y al cuidador. La integración de la detección fisiológica multimodal y la visualización de datos es esencial.

- En 10 años, deberíamos poder acceder a señales bioeléctricas utilizando hardware externo instrumentación y tienen análisis directo de comportamientos bioeléctricos y de movimiento para proporcionar un diagnóstico y/o evaluación detallados. Se utilizan dispositivos robóticos para estimular al paciente según sea necesario para adquirir los datos apropiados, desde lo motor hasta lo social. Los algoritmos para extraer automáticamente comportamientos destacados de datos multimodales deberían permitir la segmentación y el análisis de datos para ayudar en el diagnóstico cuantitativo.

En 15 años podremos lograr conectar y acceder fácilmente a señales bioeléctricas con dispositivos portátiles o implantables. Esto está vinculado a una detección multimodal integrada y sin trabas y a un entorno de visualización de datos intuitivo para el usuario y el cuidador. Los algoritmos en tiempo real permiten el análisis cuantitativo de dichos datos no sólo fuera de línea sino también en línea para informar el diagnóstico in situ y el seguimiento de pacientes a largo plazo. Los sistemas se desarrollan para uso doméstico y para la detección temprana de síntomas de trastornos generalizados, como el trastorno del espectro autista, a partir de datos de comportamiento.

### 3.2.6. Orientación adecuada al contexto

Los robots pueden proporcionar orientación apropiada para el contexto a pacientes y cuidadores humanos, combinando las fortalezas del robot (precisión, destreza a pequeña escala y capacidades sensoriales avanzadas) con las fortalezas del ser humano (conocimiento del dominio, toma de decisiones avanzada y resolución de problemas inesperados). resolviendo). Este concepto de control compartido también se conoce como sistemas colaborativos hombre-máquina, en los que el operador trabaja "en el circuito" con el robot durante la ejecución de la tarea. Como se describió anteriormente, los humanos (tanto pacientes como cuidadores) representan elementos inciertos en un sistema de control. Por lo tanto, para que un robot brinde la asistencia adecuada, es esencial que comprenda el contexto de la tarea y el comportamiento humano, para tareas como agarrar un objeto con una prótesis de mano, realizar un procedimiento quirúrgico delicado o ayudar a un paciente anciano. salir de la cama.

Se pueden proporcionar muchos tipos de asistencia u orientación. En el control de prótesis, pueden pasar décadas antes de que tengamos una comprensión suficiente del sistema nervioso humano para proporcionar retroalimentación sensorial que permita a los humanos controlar fácilmente una mano artificial con tantas articulaciones como una mano real. Por lo tanto, se necesitan controladores robóticos de bajo nivel para ayudar a controlar automáticamente las articulaciones que no están controladas directamente por el ser humano. El movimiento de las articulaciones controladas automáticamente debería ser complementario al de las articulaciones controladas por humanos, y el comportamiento resultante es tan intuitivo que el operador humano ni siquiera se da cuenta de que se está produciendo cierta autonomía. Otro ejemplo es el uso de "imágenes virtuales" en cirugía. El término "iluminación virtual" se refiere a una clase general de modos de guía, implementados en software e implementados por un dispositivo robótico, que ayudan a un sistema colaborativo hombre-máquina a realizar una tarea limitando el movimiento en regiones restringidas y/o influyendo en el movimiento a lo largo de caminos deseados. Las puntas virtuales pueden mejorar la cirugía mínimamente invasiva asistida por robot al garantizar que el manipulador dentro del paciente no ingrese a áreas prohibidas del espacio de trabajo, como superficies de órganos que no deben cortarse y estructuras de tejido delicadas. Al mismo tiempo, el cirujano debería poder anular la textura virtual si lo desea.

Un ejemplo final de dicha orientación incluye el entrenamiento de ejercicios físicos, cognitivos y/o sociales para la rehabilitación de una variedad de condiciones. La implementación de tales modos de guía requiere que el robot comprenda la tarea que el operador o usuario humano está tratando de realizar, el estado actual del humano (tanto físicamente como la intención del humano) y tenga los medios físicos y/o sociales para proporcionar

asistencia. Los hitos a continuación se basan en la creciente incertidumbre de la tarea, el operador humano y ambiente.

En 5 años, un robot debería ser capaz de rastrear, registrar y sugerir el rendimiento óptimo del procedimiento por un conjunto de procedimientos o comportamientos bien definidos, con pasos claros. El reconocimiento del comportamiento/estado humano y la correspondiente asistencia robótica debería poder lograrse en el laboratorio ambiente.

- En 10 años, un robot debería ser capaz de reconocer y clasificar el comportamiento y la intención humanas alcanzable en un entorno modificado en el que el entorno y/o las personas se aumentan para facilitar la percepción. Se deben utilizar dispositivos novedosos para proporcionar un aumento de manera discreta.

En 15 años, el robot debería ser capaz de alcanzar el rendimiento de 10 años en un entorno no modificado ambiente. Un sistema robótico debería poder recopilar datos históricos relevantes y consultar con cuidadores expertos en situaciones difíciles, incluso incorporarlos al circuito de control si es necesario.

### 3.2.7. Intervención guiada por imágenes

Ahora consideramos una intervención robótica guiada por imágenes, que se centra en la visualización de las estructuras internas de un paciente para guiar un dispositivo robótico y/o su operador humano. Esto generalmente se asocia con cirugía y radiología intervencionista, aunque los conceptos descritos aquí podrían aplicarse de manera más amplia a cualquier necesidad de atención médica en la que no se pueda visualizar al paciente de forma natural. Independientemente de la aplicación, dichas intervenciones requieren avances en la adquisición y el análisis de imágenes, el desarrollo de robots que sean compatibles con los entornos de imágenes y métodos para que los robots y sus operadores humanos utilicen los datos de las imágenes.

Los datos de los sensores son esenciales para construir modelos y adquirir información en tiempo real durante la cirugía y la radiología intervencionista. Las técnicas de imágenes médicas en tiempo real, como la resonancia magnética (MRI), la ecografía, la espectroscopia y la tomografía de coherencia óptica (OCT), pueden proporcionar beneficios significativos cuando permiten al médico ver las estructuras del subsuelo y/o las propiedades de los tejidos. Además, las imágenes adquiridas preoperatoriamente se pueden utilizar para planificación y simulación. Se necesitan nuevas técnicas como la elastografía, que cuantifica de forma no invasiva la distensibilidad del tejido, para proporcionar imágenes que proporcionen información física cuantitativa útil. Para el control de robots aún no se conocen la velocidad y resolución de imágenes necesarias. Hay que determinar cómo integrarlos con los sistemas robóticos para proporcionar información útil al cirujano y al robot para reaccionar ante la salud del paciente en tiempo real.

Una de las formas más útiles de obtención de imágenes es la resonancia magnética (MRI). El diseño de robots compatibles con MRI es especialmente desafiante porque la MRI se basa en un fuerte campo magnético y pulsos de radiofrecuencia (RF), por lo que no es posible utilizar componentes que puedan interferir con estos efectos físicos o ser susceptibles a ellos. Esto descarta la mayoría de los componentes utilizados en robots típicos, como motores eléctricos y materiales ferromagnéticos. Además, la cirugía o la radiología intervencionista dentro de un generador de imágenes imponen graves limitaciones al tamaño y la geometría del robot, así como a la naturaleza de la interacción médico-robot. Se requieren materiales, mecanismos de actuación y sensores novedosos para crear robots que puedan integrarse perfectamente en el conjunto de intervenciones.

**Se requieren materiales,  
mecanismos de actuación y  
sensores novedosos para crear  
robots que puedan integrarse  
perfectamente en el conjunto de intervenciones**

---

Dada la abundancia de diferentes tipos de intervenciones, es útil considerar hitos que aborden los diferentes tipos de cirugía que podrían realizarse con asistencia robótica. Cada uno de estos hitos implica los mismos conceptos para comportamientos de robots semiautomáticos y totalmente automatizados, solo que en diferentes niveles de complejidad.

- En cinco años, deberíamos poder utilizar imágenes para realizar diagnósticos y tratamientos ultramínimamente invasivos. terapia, utilizando agujas que pueden alcanzar los objetivos deseados evitando estructuras delicadas. Los robots deberían permitir la transformación automática de datos de imágenes en modelos físicos de pacientes específicos para guiar estas intervenciones.
- En 10 años, deberíamos tener microrobots nadadores capaces de administrar medicamentos localmente y usar Modelo automático de estructura vascular a partir de imágenes espaciales. Además, estos robots deberán tener un diseño de locomoción y control compatible con imágenes (utilizando modelos de mecánica de fluidos) y localización automática de patologías en tiempo real a partir de sensores fisiológicos compatibles con imágenes.

En 15 años, podremos lograr asistentes quirúrgicos semiautomáticos y automatizados que utilicen completamente Generación de imagen a modelo en tiempo real (incluida geometría, mecánica y estado fisiológico).

Los datos de la imagen deben usarse para generar planificadores en línea y controlar la retracción y resección de órganos en procedimientos quirúrgicos mínimamente invasivos diestros.

### 3.2.8. Manipulación de alta destreza a cualquier escala

El diseño y control de los dispositivos es clave para el funcionamiento de toda robótica médica y sanitaria, ya que interactúan físicamente con su entorno. En consecuencia, uno de los desafíos técnicos más importantes se encuentra en el área de los mecanismos. Por ejemplo, en aplicaciones quirúrgicas, cuanto más pequeño es un robot, menos invasivo es el procedimiento para el paciente. Y en la mayoría de los procedimientos, una mayor destreza da como resultado cirugías más eficientes y precisas. También consideramos la posibilidad de una cirugía a escala celular; Ya se han implementado pruebas de concepto de esto en el laboratorio. Otro ejemplo es la recuperación; Los robots de rehabilitación actuales son de gran tamaño y están relacionados con la clínica. Del mismo modo, los fisioterapeutas humanos tienen una disponibilidad limitada. Sin embargo, para muchos pacientes, una terapia eficaz a largo plazo claramente exige sesiones de capacitación más largas y frecuentes de lo que es asequible o práctico en la clínica. Los dispositivos portátiles a escala humana, o al menos aquellos que puedan llevarse fácilmente a casa, permitirían aplicar terapias de rehabilitación de formas sin precedentes. Finalmente, considere una prótesis de mano diestra. Para replicar completamente las articulaciones de una mano real, utilizando los mecanismos, diseños de actuadores y fuentes de energía actuales, sería necesario que la mano fuera demasiado pesada o grande para que un humano la use de forma natural. Mecanismos pequeños y diestros permitirían grandes avances hacia prótesis más realistas.

La miniaturización es un desafío en gran parte porque los actuadores electromecánicos actuales (el estándar debido a su controlabilidad deseable y su relación potencia-peso) son relativamente grandes. Los análogos biológicos (por ejemplo, los músculos humanos) son muy superiores a los sistemas diseñados en términos de compacidad, eficiencia energética, baja impedancia y alta producción de fuerza. Curiosamente, estos sistemas biológicos a menudo combinan "mecanismos" y "actuación" en un sistema integrado e inseparable. El diseño de mecanismos novedosos irá de la mano con el desarrollo de actuadores. Además, será necesario controlar cada combinación de actuador/mecanismo para que alcance su máximo comportamiento potencial, especialmente cuando se requiere destreza.

Es necesario desarrollar modelos para optimizar las estrategias de control; esto puede incluso motivar el diseño de mecanismos que sean especialmente sencillos de modelar.

Naturalmente, los objetivos de los sistemas que logran una gran destreza a cualquier escala diferirán mucho dependiendo de la aplicación médica (por ejemplo, los ejemplos de cirugía, rehabilitación y prótesis mencionados anteriormente). Por lo tanto, un conjunto natural de hitos para el diseño de mecanismos es considerar las capacidades vinculadas a cada una de estas aplicaciones en orden de complejidad creciente.

- En cinco años, las manos robóticas para prótesis deberían tener suficientes grados de libertad y destreza con estructura liviana para lograr una manipulación natural. Deben estar disponibles manipuladores móviles para manejar entornos estructurados (por ejemplo, recoger y entregar objetos específicos).

En 10 años, los manipuladores robóticos para cirugía deberían poder realizar maniobras similares a serpientes en gran profundidad, como la que se requiere para la cirugía de orificios naturales. Los manipuladores de objetos cotidianos deben ampliarse para manejar objetos y tareas más generales (recoger, entregar, girar, abrir puertas, presionar un botón, mover el control deslizante, etc.).

- En 15 años, los robots a microescala deberían poder ayudar en la microcirugía diestra en pequeños Estructuras como el ojo, así como cirugía a escala celular. La manipulación móvil con energía y computación a bordo debería manipular objetos de forma segura en entornos cotidianos.

### 3.2.9. Adquisición de datos de salud automatizada basada en sensores

Nos acercamos a una era de percepción casi generalizada. Las cámaras son baratas, cada vez más baratas y los algoritmos de análisis de imágenes son cada vez mejores. La infraestructura de redes continúa mejorando. Por cualquier motivo (seguridad del hogar, cámaras para mascotas, etc.), es probable que la red de sensores resultante observe partes importantes de nuestras vidas. Otros sensores también son cada vez más eficaces y más comunes. Nuestros teléfonos móviles incluyen acelerómetros, cámaras y GPS, que proporcionan considerable información. Si a esto le sumamos el rápido crecimiento de las imágenes médicas más convencionales y la posibilidad de otros biosensores, como monitores portátiles o cámaras insertadas e inodoros instrumentados, resulta técnicamente factible para cada uno de nosotros tener un registro detallado que abarque la nutrición, el comportamiento y la salud. physAI agregar toda la población, tendremos una base de datos mucho más detallada y de mayor alcance que cualquier cosa que hayamos visto en el pasado. Una base de datos de este tipo permite un nuevo nivel de investigación médica basada enteramente en datos históricos. En la actualidad, los estudios médicos están dirigidos a abordar cuestiones o hipótesis específicas, y el costo de estos estudios restringe el alcance y la duración. También hay algunos tipos de datos, como patrones de comportamiento en la vida normal, que son muy difíciles de obtener en la actualidad. Una base de datos a gran escala permite una investigación más abierta, identificando patrones o correlaciones que quizás nunca se hubieran sospechado. También aporta un nuevo nivel de atención médica personalizada, brindando diagnósticos más rápidos y precisos, así como una fuente de consejos sobre elecciones de estilo de vida y sus posibles consecuencias.iología.

- En cinco años, comenzar un esfuerzo concertado de recopilación de datos. Comenzar a agregar los datos de salud existentes (en formato anónimo apropiado) para facilitar el análisis. Trabajar con las diversas comunidades de salud y las partes interesadas en la recopilación de datos para facilitar el acceso a datos anónimos. Aprender de modelos exitosos (por ejemplo, la base de datos genética de Islandia).

En 10 años, aplicar algoritmos de extracción de datos al creciente conjunto de datos. Implementar datos sofisticados  
Compartir técnicas para facilitar el acceso no sólo a la comunidad investigadora sino también a profesionales sanitarios y pacientes.

En 15 años, hacer que 15 años de datos de salud para una nación y más estén disponibles en forma anónima  
formulario a todos los investigadores, profesionales de la salud y usuarios no profesionales interesados a través de una interfaz web adecuada, mientras continúa recopilando datos a largo plazo y poniéndolos a disposición.

### 3.2.10. Comportamiento seguro del robot

El desafío de la acción y reacción segura de los robots es tan antiguo como el propio campo de la robótica. Sin embargo, la seguridad adquiere una nueva dimensión cuando las interacciones directas y cercanas con usuarios humanos, a menudo vulnerables, constituyen el núcleo del propósito del robot. Proporcionar una respuesta adecuada al comportamiento humano (por ejemplo, conocer la diferencia entre un comportamiento humano involuntario y una intención específica) representa un nuevo desafío técnico.

El robot debe poder anticipar comportamientos o condiciones peligrosas (es decir, crear restricciones virtuales) y responder a cualquier condición urgente en entornos domésticos en todas las condiciones. Esta operación se logra mucho más fácilmente en sistemas sin contacto, es decir, HRI que no implica contacto físico ni aplicación de fuerza entre el usuario y el robot. Cuando se trata de contacto, la investigación se centra en mecanismos inherentemente seguros a nivel mecánico y de hardware para facilitar la seguridad mucho antes que el nivel de software.

La seguridad del comportamiento tiene implicaciones más profundas que la mera interacción física. Si bien la robótica de asistencia social no suele implicar ningún contacto físico entre el robot y el usuario, la interacción puede dar lugar a emociones no deseadas, como un fuerte apego o aversión. Si bien todavía no se han observado respuestas de este tipo, se deben tener en cuenta las posibilidades en el contexto del diseño de sistemas seguros.

- En cinco años, continuar con el desarrollo de un accionamiento inherentemente seguro, de bajo peso y resistencia cuerpos de robot asequibles para servicio y robótica de asistencia social para pruebas en clínicas y en el hogar para tareas específicas.

En 10 años, crear prototipos asequibles para sistemas robóticos en clínicas y en casa para uso intensivo  
Evaluación con usuarios heterogéneos (proveedores de salud, familiares, pacientes). Recopile datos longitudinales para seguridad y usabilidad.

En 15 años, el despliegue seguro de sistemas robóticos en entornos no estructurados (por ejemplo, hogares, entornos al aire libre) que implican la interacción hombre-máquina en tiempo real con usuarios desconocidos, con una formación mínima y utilizando interfaces intuitivas.

### 3.3. Problemas de implementación

El despliegue de sistemas completos de robótica sanitaria requiere cuestiones prácticas de funcionamiento seguro, fiable y continuo en entornos humanos. Los sistemas deben ser privados y seguros, e interoperables con otros sistemas del hogar. Para pasar del progreso incremental a las implicaciones a nivel de sistema, el campo de la robótica médica y sanitaria necesita nuevas herramientas y métodos de medición basados en principios para una demostración, evaluación y certificación eficientes.

El desafío de la evaluación de sistemas se ve agravado por la naturaleza del problema: evaluar la función y el comportamiento humanos como parte del sistema mismo. La caracterización cuantitativa de la patología es un problema existente en medicina; La robótica tiene el potencial de contribuir a resolver este problema al permitir métodos para la recopilación y análisis de datos cuantitativos sobre la función y el comportamiento humanos. Al mismo tiempo, parte de la prestación de atención de salud es inherentemente de naturaleza cualitativa y tiene que ver con la terapia, la motivación y la interacción social; Si bien estos métodos son estándar en las ciencias sociales, no son reconocidos ni aceptados por la comunidad médica. Dado que la robótica médica y sanitaria debe funcionar tanto con especialistas capacitados como con usuarios legos, es necesario lograr la aceptación de ambas comunidades. Esto requiere reproducibilidad de experimentos, estándares, reutilización de códigos, reutilización/compañía de plataformas de hardware, ensayos clínicos, datos confiables para afirmar su eficacia y trasladar robots del laboratorio al mundo real. A medida que los sistemas se vuelven cada vez más inteligentes y autónomos, es necesario desarrollar métodos para medir y evaluar tecnologías adaptativas que cambian junto con la interacción con el usuario.

La asequibilidad de la tecnología robótica debe abordarse en varios niveles diferentes. El hospital paga un costo significativo en términos de inversión de capital para adquirir un robot, los costos de mantenimiento son altos y el costo de desarrollar robots es inmenso, dada su complejidad y estrictos requisitos de desempeño para aplicaciones médicas. Se necesitan políticas para abordar las barreras regulatorias, la cuestión de las licencias y la certificación estado por estado, las reglas para la supervisión y la enseñanza con robots y el reembolso a través de las compañías de seguros. Finalmente, debemos considerar la cultura de ambos cirujanos.

y pacientes; Ambos grupos deben tener fe en la tecnología robótica para una aceptación generalizada.

El objetivo final de la robótica médica y de salud es que un consumidor pueda ir a una tienda y comprar un sistema apropiado, muy parecido a como se compra una computadora hoy en día, y luego integrar ese sistema en el hogar sin necesidad de modernizarlo. Se debe demostrar que la tecnología es eficaz, asequible y aceptada. La falta de una industria de apoyo ralentiza los avances en la robótica médica y sanitaria.

Para crear una industria de robótica sanitaria, primero se deben destinar recursos a financiar empresas colaborativas que reúnan la experiencia necesaria en ingeniería, salud y negocios. Se necesita financiación específicamente en las áreas de incubación y producción de sistemas completos y evaluación de aquellos en poblaciones de pacientes en ensayos que duran un año o más. Actualmente no existe ninguna agencia de financiación para dicha incubación: la investigación es demasiado tecnológica para los NIH, demasiado médica para la NSF y demasiado alejada de un mercado inmediato para ser financiada por empresas o capital de riesgo. Como resultado, hay una falta de masa crítica de innovaciones tecnológicas, productos y negocios nuevos, probados y desplegados para crear una industria.

Una industria próspera requiere capacitación en investigación, implementación, evaluación y despliegue de robótica sanitaria. Las universidades ya están dando el primer paso para facilitar esto mediante el desarrollo de programas interdisciplinarios que unen la formación médica y la ingeniería a nivel de pregrado y posgrado. También se presta mayor atención a la extensión K-12, utilizando el ya popular y atractivo tema de la robótica. La robótica relacionada con la salud, en particular, recluta eficazmente a niñas para la ingeniería, abordando otra importante tendencia laboral, ya que las mujeres desempeñan un papel clave tanto en la atención sanitaria como en la prestación de cuidados informales.

Los recursos  
deben  
destinarse a  
proyectos  
de colaboración  
que reúnan la  
experiencia  
necesaria en ingeniería, s

---

## 4. Investigación/Tecnologías Básicas

Lograr las capacidades orientadas a las aplicaciones descritas anteriormente requerirá una progresión significativa de la investigación en robótica básica y las tecnologías resultantes. Esta sección describe la investigación básica en robótica necesaria para avanzar en la robótica médica y sanitaria.

### 4.1. Arquitectura y representaciones

Las arquitecturas de control de robots encapsulan principios organizativos para el diseño adecuado de programas que controlan los sistemas de robots. Uno de los problemas fundamentales más complejos que abordan las arquitecturas es la integración de bucles continuos de percepción-acción de bajo nivel con razonamiento simbólico de alto nivel mediante el uso de representaciones de datos apropiadas. El desarrollo de arquitecturas de control de robots ha alcanzado un nuevo nivel de complejidad con los sistemas robóticos médicos y sanitarios, porque dichos sistemas deben interactuar, en tiempo real, con entornos complejos del mundo real, que van desde el tejido humano hasta las interacciones sociales humanas. Dichos sistemas e interacciones presentan detección multimodal, varios tipos de interacciones incorporadas y desafíos para la representación y manipulación de datos en una escala de tiempo necesaria para una respuesta oportuna. Para abordar estos desafíos, se deben desarrollar arquitecturas que faciliten la programación basada en principios para sistemas ágiles y adaptables para entornos inciertos que involucran interacciones físicas y/o no físicas directas con uno o varios usuarios humanos. Para la interacción humano-robot, las arquitecturas también deben tener en cuenta

para modelar sistemas cognitivos, representaciones de habilidades y entornos, razonamiento sobre incertidumbre, aprendizaje de habilidades jerárquicas y permanentes y modelado de usuarios, interacción social en tiempo real (incluido el habla/interacción lenguaje-actividad física) y recuperación de fracasos, entre otros.

## 4.2. Métodos formales

Los métodos formales son enfoques matemáticos para la especificación, desarrollo y verificación de sistemas. En robótica médica y sanitaria, permiten numerosas capacidades básicas. Un conjunto de áreas son herramientas sólidas de modelado, análisis y simulación para sistemas de múltiples escalas. Los métodos formales permiten una integración óptima del sistema, de modo que podemos diseñar sistemas basados en tecnologías robóticas cuyos componentes funcionen entre sí de una manera completamente predecible. Para los robots médicos que interactúan directamente con cuidadores humanos y pacientes, los diseños de controladores, planificadores, software operativo y hardware deben verificarse y validarse como seguros utilizando métodos formales. En este momento, la mayor parte del trabajo con métodos formales no incorpora la incertidumbre en la medida necesaria para la robótica médica y sanitaria. Un objetivo relacionado es el uso de métodos formales en el diseño y modelado del comportamiento de sistemas que funcionan con humanos, incluido el modelado formal del comportamiento humano y la interacción entre humanos y robots.

## 4.3. Control y planificación

El control, definido aquí como el cálculo de comandos de robot de bajo nivel (como cuánto torque debe aplicar un motor) es un componente esencial de todos los robots físicos. En la robótica médica, un aspecto particularmente importante del control es el control de contacto/fuerza. En esta forma de control, normalmente queremos que un robot mantenga contacto con el entorno con una fuerza determinada, por ejemplo, aplicando fuerza a un paciente en un escenario de rehabilitación, haciendo contacto con el tejido blando durante la palpación y agarrando un objeto con una prótesis. Mantener un contacto estable y seguro es un desafío debido a retrasos temporales y modelos dinámicos imperfectos (especialmente modelos de fricción). Todos estos problemas deben abordarse mediante mejoras en el diseño, modelado y control de robots, todo en paralelo. Así, la evolución vigente/  
El control de contacto es esencial para el avance de los robots en contacto con entornos inciertos.

Para que cualquier robot funcione de forma autónoma o semiautónoma, debe utilizar un plan para decidir un curso de acción. Ejemplos de planes en robótica médica y sanitaria incluyen un plan sobre cómo ayudar a un paciente a levantarse de la cama y un plan sobre cómo un robot puede alcanzar un tumor en un órgano. En robótica médica y sanitaria, los planes deben ser adaptables a las aportaciones humanas (p. ej., la de un cirujano, un cuidador o un paciente) y a entornos inciertos (p. ej., tejidos blandos, un entorno vivo o un paciente en rehabilitación). Si bien la planificación ha sido un componente extremadamente exitoso de la investigación en robótica, gran parte del trabajo existente se basa en un conocimiento detallado del entorno y está diseñado para sistemas completamente autónomos. Las consideraciones de planificación para la robótica médica y sanitaria requieren nuevos enfoques para su funcionamiento en entornos inciertos y con intervención humana.

## 4.4. Percepción

La percepción de los robots, que utiliza datos y modelos de sensores para desarrollar una comprensión de una tarea, un entorno o un usuario, es un componente crucial de todos los robots médicos. En la cirugía guiada por imágenes, los datos de las imágenes deben analizarse y transformarse en información útil sobre características particulares, como órganos, obstáculos (p. ej., el hueso pélvico en cirugía urológica) y áreas objetivo (p. ej., un tumor incrustado en el hígado). Esta percepción a menudo requiere no sólo datos de sensores, sino también información de un "atlas", que registra las características identificadas en muchos pacientes similares, a fin de guiar el proceso de reconocimiento de características importantes en un paciente en particular. La salida del sistema de percepción se puede utilizar para desarrollar

un plan quirúrgico, crear una simulación y proporcionar retroalimentación en tiempo real a un operador humano. Otra forma de percepción relevante para la atención sanitaria es la interpretación de datos de sensores táctiles, de fuerza y de contacto para construir modelos de humanos, robots y entornos, y la interacción entre ellos. Por ejemplo, si una mano protésica sostiene una copa usando un sistema de control de bajo nivel (para disminuir la atención humana requerida), es esencial procesar datos que permitan a la mano determinar si la copa se está aplastando o se está saliendo del soporte. agarrar y cuánto líquido contiene.

Una cuestión relacionada es que los sistemas robóticos para el cuidado de la salud también deben comprender algunos aspectos de cómo funciona la percepción humana. Por ejemplo, en la cirugía guiada por imágenes, la información debe presentarse al operador humano de una manera que sea intuitiva, tenga el nivel adecuado de detalle y resolución y no distraiga la atención de la tarea en cuestión. Otro ejemplo son las aplicaciones en prótesis controladas por el cerebro y algunas formas de rehabilitación física asistida por robots. Para tales sistemas, comprender cómo los humanos interpretarán la retroalimentación del robot es clave para la selección de sensores y la forma en que se presentan sus datos. Estas tareas requieren mejores modelos de percepción humana y permitirán optimizar la interacción entre humanos y robots.

Finalmente, un desafío clave para los sistemas que interactúan con un usuario es la percepción y comprensión en tiempo real de la actividad del usuario para permitir una interacción hombre-máquina efectiva. El comportamiento humano natural y sin restricciones es complejo, notoriamente impredecible y plagado de incertidumbre. El desarrollo de sensores portátiles y modelos predictivos es necesario para facilitar soluciones a la percepción y comprensión del comportamiento humano, como se analiza en la Sección 4.9, a continuación.

## 4.5. Sensores robustos y de alta fidelidad

Nos centramos aquí en dos tipos de sensores especialmente importantes para la medicina y la atención sanitaria: sensores biocompatibles/implantables y sensores de fuerza/táctiles. Estos sensores, junto con los algoritmos de percepción, a menudo son necesarios para informar el estado del cuidador/médico, del paciente y (en algunos casos) del entorno.

Los sensores biocompatibles/implantables serían un gran catalizador para avances importantes en este campo. La estrecha interacción física entre robots y pacientes requiere sistemas que no dañen los tejidos biológicos ni dejen de funcionar cuando entren en contacto con ellos. En cirugía, se deben diseñar mecanismos que no dañen involuntariamente los tejidos, y los sensores deben poder funcionar adecuadamente en un ambiente con humedad, desechos y temperatura variable. En el caso de las prótesis, los sensores y sondas deben acceder a los músculos, las neuronas y el tejido cerebral y mantener la funcionalidad durante largos períodos sin que se degrade el rendimiento. Estos sensores y dispositivos deben diseñarse teniendo en cuenta las aplicaciones de robótica médica y sanitaria para cumplir con los requisitos de rendimiento.

Cuando los robots trabajan en entornos no estructurados, especialmente alrededor y en contacto con humanos, utilizar el sentido del tacto es crucial para operaciones precisas, eficientes y seguras. Se requieren datos táctiles, de fuerza y de contacto para la manipulación informada de materiales blandos, desde órganos humanos hasta mantas y otros objetos del hogar. Es particularmente desafiante adquirir e interpretar información táctil distribuida espacialmente, debido a la gran área y la alta resolución que se requiere de los sensores. Los sensores actuales tienen limitaciones en cuanto a robustez, resolución, deformabilidad y tamaño.

## 4.6. Mecanismos novedosos y actuadores de alto rendimiento

Para sistemas que van desde robots quirúrgicos mínimamente invasivos hasta implantes protésicos de tamaño humano, los robots necesitan actuadores y mecanismos muy pequeños con una alta relación potencia-peso. Estos diseños nos permitirán construir robots que sean más pequeños, utilicen menos energía y sean menos costosos. Esto permite una mayor

eficacia, así como su difusión a la población necesitada. Destacaremos a continuación dos ejemplos de cómo los avances en mecanismos y actuadores podrían mejorar la medicina.

En cirugía, se necesitan mecanismos novedosos que permitan la destreza de robots muy pequeños y económicos que puedan controlarse mecánicamente fuera del cuerpo. Dado que muchos mecanismos son difíciles de esterilizar, la cirugía se beneficiaría de dispositivos desechables construidos con materiales económicos y utilizando métodos de ensamblaje eficientes. Como se mencionó anteriormente, la capacidad de la cirugía guiada por imágenes depende (para algunos métodos de imágenes) de robots compatibles especialmente diseñados que eliminan los componentes eléctricos y magnéticos. Esto impone limitaciones particulares a los actuadores, que son electromecánicos en la mayoría de los robots existentes.

Las prótesis avanzadas también motivan mejoras significativas en los mecanismos y actuadores. El diseño de manos robóticas con la destreza de las manos humanas, y de brazos y piernas con la fuerza de los brazos y piernas humanos, es especialmente desafiante considerando las limitaciones de volumen y peso que exige la forma humana. Mecanismos que utilizan topologías novedosas, habilitados por la teoría cinemática y una comprensión profunda de las propiedades de los materiales; otra preocupación importante para las prótesis es cómo se alimentarán. La relación potencia-peso de los actuadores convencionales (electromecánicos) es inferior a muchas otras tecnologías potenciales, como las aleaciones con memoria de forma/superelásticas y la conversión directa de energía química a mecánica (por ejemplo, monopropulsores). Sin embargo, muchas tecnologías nuevas de actuadores son problemáticas por razones de seguridad, tiempos de reacción lentos y dificultades para un control preciso. Necesitamos continuar explorando y desarrollando estos y otros posibles actuadores robóticos.

## 4.7. Aprendizaje y adaptación

Como se analizó en la Sección 3.2.4, la capacidad de un sistema para mejorar su desempeño con el tiempo y mejorar el desempeño del usuario son objetivos clave de la robótica médica y sanitaria. Con este fin, se necesita un trabajo dedicado e integral en el aprendizaje automático estadístico aplicado a datos médicos y de salud multimodales e inciertos del mundo real y avanzando más allá de dominios específicos y estrechos hacia modelos de salud más usuarios. Dichos algoritmos de aprendizaje deben garantizar niveles garantizados de rendimiento del sistema (seguridad, estabilidad, etc.) mientras aprenden nuevas políticas, comportamientos y habilidades. Esto es especialmente importante en el modelado de usuarios y el aprendizaje de tareas a largo plazo y de por vida, ambos objetivos principales de los sistemas de asistencia. Los crecientes esfuerzos en el ámbito del aprendizaje y la adquisición de habilidades mediante la enseñanza, la demostración y la imitación deben dirigirse hacia los ámbitos médicos y de salud del mundo real, utilizando nuevamente datos inciertos del mundo real para fundamentar su relevancia. En general, el aprendizaje y la adaptación a los usuarios, a los entornos y a las tareas deberían convertirse en un componente estándar de los sistemas robóticos inteligentes utilizables y robustos del futuro próximo.

## 4.8. Interacción física humano-robot

La interacción física entre humanos y robots es inherente a la mayoría de las aplicaciones médicas. Como se describió anteriormente, tales interacciones requieren sensaciones, percepciones y acciones apropiadas. Para detectar al ser humano se podrían utilizar sensores robóticos convencionales o sensores biocompatibles/implantables, como interfaces cerebro-máquina. Estos datos de sensores deben combinarse con modelos para permitir la percepción. El modelado y/o la simulación de la forma y función humana son la base para el diseño de robots que entran en contacto físico con los humanos. Queda mucho trabajo por hacer en esta área, ya que no entendemos completamente qué modelos de humanos son útiles para optimizar el diseño, la percepción, el control y la planificación de los robots.

Un aspecto importante del contacto físico entre humanos y robots es la háptica (la tecnología del tacto). Cuando los médicos o los pacientes utilizan robots para interactuar con entornos remotos en distancia o escala, el operador necesita tener una interfaz natural que haga que el robot parezca "transparente". Eso es,

El operador de un robot quirúrgico, de prótesis o de rehabilitación debe sentir como si estuviera manipulando directamente un entorno real en lugar de interactuar con un robot. Las pantallas hápticas (de fuerza y táctiles) brindan al usuario retroalimentación similar a lo que siente en el mundo real. Esta retroalimentación háptica puede mejorar el rendimiento en términos de precisión, eficiencia y comodidad.

## 4.9. Robots socialmente interactivos

La interacción social efectiva con un usuario (o un grupo de usuarios) es de vital importancia para permitir que la robótica médica y sanitaria sea útil para mejorar los resultados de salud en aplicaciones de convalecencia, rehabilitación y bienestar. La voluntad del usuario de interactuar con un robot de asistencia social para aceptar consejos, interactuar y, en última instancia, alterar las prácticas de comportamiento para lograr las mejoras deseadas, depende directamente de la capacidad del robot para obtener la confianza del usuario y mantener su interés. Con ese fin, se deben desarrollar interfaces de usuario y dispositivos de entrada que sean fáciles e intuitivos para una variedad de usuarios, incluidos aquellos con necesidades especiales. Se aprovecharán y avanzarán aún más los sensores portátiles, varitas y otras modalidades de interacción cada vez más ubicuas, junto con los gestos, faciales y físicos.

expresión del movimiento y otros medios de comunicación corporal. La interacción social es inherentemente bidireccional y, por lo tanto, implica percepción y comunicación multimodal, incluidos medios verbales y no verbales. Por lo tanto, la detección y clasificación automatizada del comportamiento, el reconocimiento de actividades, incluida la intención del usuario, la atención a tareas específicas y el reconocimiento de fallas, son componentes habilitadores críticos para HRI. La investigación sobre el papel de la personalidad y su expresión, así como la comprensión automatizada de las emociones y la expresión creíble de las emociones a través de múltiples canales (voz, rostro, cuerpo) son necesarias para facilitar una interacción humano-máquina creíble en tiempo real.

## 4.10. Modelado, simulación y análisis

Una variedad de modelos es importante para aplicaciones de robótica médica y sanitaria. Podemos dividirlos en dos categorías principales relevantes para la robótica médica y de la salud: modelado de personas (desde la biomecánica de tejidos hasta el comportamiento cognitivo y físico humano) y modelado de sistemas de ingeniería (incluida la integración de información/arquitecturas y plataformas abiertas y bajas). Los modelos pueden ser de biomecánica, fisiología, dinámica, entorno, geometría, estado, interacciones, tareas, cognición y comportamiento. Los modelos se pueden utilizar para muchas tareas, incluido el diseño óptimo, la planificación, el control, la ejecución de tareas, las pruebas y la validación, el diagnóstico y el pronóstico, la capacitación y la interacción social y cognitiva.

A continuación proporcionamos algunos ejemplos específicos de modelos necesarios para la medicina y la atención sanitaria. En la cirugía teleoperada (remota) con retrasos en el tiempo, se requieren modelos del paciente para permitir la interacción natural entre el cirujano y el entorno operativo remoto. Los modelos de tejidos en general son necesarios para la planificación de procedimientos, simuladores de entrenamiento y sistemas de guía automatizados. Estos apenas están comenzando a aplicarse en operaciones con agujas, pero modelos más sofisticados permitirían la planificación y la orientación apropiada al contexto para una variedad más amplia de procedimientos, como la cirugía laparoscópica y la cirugía celular. Los modelos que sean suficientemente realistas para ser representados en tiempo real permitirían simulaciones quirúrgicas de alta idealidad para la capacitación general y la práctica específica de cada paciente realizada por los cirujanos. Para los robots de asistencia sanitaria, necesitamos modelos de cognición y comportamiento humanos para proporcionar una asistencia motivacional adecuada. También se necesitan modelos físicos de todo el cuerpo de un paciente para que un robot proporcione asistencia física en tareas como comer o levantarse de la cama.

Como otro ejemplo, consideremos un sistema de rehabilitación que utiliza tecnología robótica para un diagnóstico temprano y preciso. Un sistema de este tipo necesitaría modelos del paciente y su déficit para diseñar tratamientos apropiados y evaluar con precisión los resultados. (Lo ideal sería que el modelo del paciente cambiara después del tratamiento). Estos modelos también son necesarios para que la tecnología robótica participe y aumente

diagnóstico. Para comprender la actividad humana en contexto, como evaluar la precisión y eficacia de los ejercicios de rehabilitación o la actividad diaria, se necesitan modelos complejos que capturen eficazmente las capacidades del usuario (basados en una evaluación inicial, la edad, el nivel de déficit, etc.), y que puedan ser utilizados para clasificar y analizar la actividad que se realiza (reconocer efectivamente el ejercicio de otra actividad) combinado con el estado del usuario (si la frecuencia cardíaca está en el rango correcto, si el usuario está excesivamente frustrado, etc.) para evaluar el progreso (¿está mejorando el rendimiento del ejercicio? , aumenta la resistencia, mejora la precisión, etc.) y proporciona el entrenamiento adecuado. Tanto la actividad como los estados fisiológicos son señales complejas que requieren modelado para facilitar la clasificación y la predicción. Se necesitan tanto modelos de población como modelos individuales para abordar problemas desafiantes de detección, clasificación y predicción de actividades y estados humanos en línea en tiempo real.

## 5. Colaboradores

Este documento se basa en el taller titulado "Una hoja de ruta de investigación para la robótica médica y sanitaria", celebrado del 19 al 20 de junio de 2008 en Arlington, VA. El taller fue patrocinado por el Computing Community Consortium (CCC), parte de la Computing Research Association (CRA), a través de una subvención de la Fundación Nacional de Ciencias de EE. UU. (NSF).

A continuación se enumeran 37 investigadores y representantes industriales que asistieron al taller o contribuyeron de otra manera a este documento. El taller y la elaboración de este documento estuvieron a cargo de Maja Mataric', Allison M. Okamura y Henrik Christensen.

Ron Alterovitz Universidad de Berkeley, UCSF	Neville Hogan Instituto de Massachusetts de tecnología	Allison Okamura Universidad Johns Hopkins
David Brown Diseño Kinea	Ayana Howard Tecnología de Georgia	Marcia O'Malley Universidad de arroz
M. Cenk Cavusoglu Reserva Case Occidental Universidad	Roberto Howe Universidad Harvard	charlie ortiz SRI
Howie Choset Universidad de Carnegie mellon	Chad Jenkins Universidad marrón	Brian Scassellati Universidad de Yale
Henrik Christensen Tecnología de Georgia	Dan Jones Quirúrgico Intuitivo	Reid Simmons Universidad de Carnegie mellon factura inteligente
Mark Cutkosky Universidad Stanford	Timothy Judkins Automatización inteligente	Universidad de Washington en st. luis
Hari Das Nayar NASA/JPL	James Koeneman Músculos cinéticos, Inc.	John Spletzer Universidad de Lehigh
Jaydev Desai Universidad de Maryland	Venkat Krovic Búfalo soleado	Tomás Azúcar Universidad del estado de Arizona
Aarón Dólar Harvard/MIT	Corinna Latham AnthroTronix, Inc.	Stewart Tansley Investigación de Microsoft
Aaron Edsinger Robótica Meka	Ming Lin UNC Chapel Hill	Russell Taylor Universidad Johns Hopkins
Miguel Encarnação humana	Jay Martín ortocuidado	Frank Tendick Chris Ulrich Inmersión
Brian Gerkey Garaje de sauce	Maja Mataric' Universidad del Sur California	Holly Yanco Universidad de Massachusetts Lowell



## Capítulo 3

# Una hoja de ruta para la robótica de servicios

## 1. Introducción

La Robótica de Servicios se define como aquellos sistemas robóticos que ayudan a las personas en su vida diaria, en el trabajo, en el hogar, en el ocio y como parte de la asistencia a personas discapacitadas y mayores. En la robótica industrial la tarea suele ser automatizar tareas para lograr una calidad de producción homogénea o una alta velocidad de ejecución. Por el contrario, las tareas de la robótica de servicios se realizan en espacios ocupados por humanos y normalmente en colaboración directa con personas. La robótica de servicios normalmente se divide en profesional y personal servicios.

La robótica de servicios profesionales incluye agricultura, respuesta a emergencias, oleoductos e infraestructura nacional, silvicultura, transporte, limpieza profesional y varias otras disciplinas. [Los robots de servicio profesional también se utilizan con fines militares, pero su aplicación en esta área no se incluye en este informe.] Estos sistemas normalmente ayudan a las personas a ejecutar tareas en el lugar de trabajo. Según IFR/VDMA World Robotics, hoy en día se utilizan más de 38.000 robots profesionales y el mercado crece rápidamente cada año. En la figura 1 se muestran varios robots profesionales típicos.

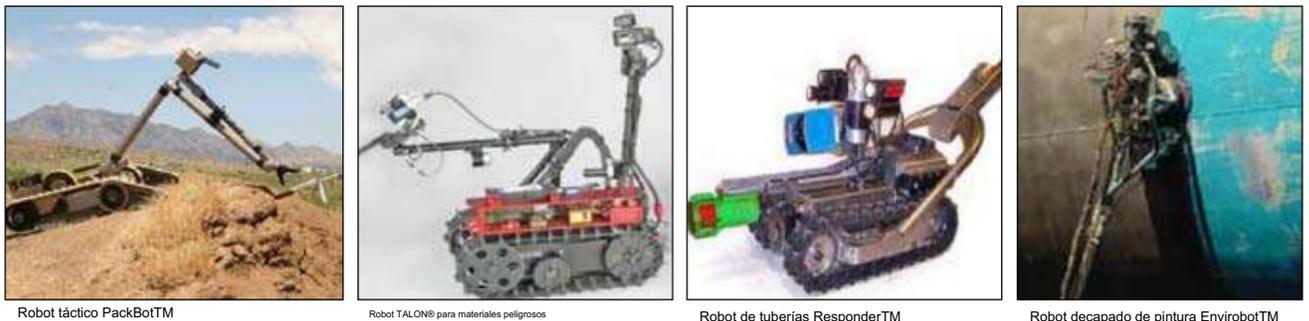


Figura 1: Robots de servicio típicos para aplicaciones profesionales.

Por otro lado, los robots de servicios personales se utilizan para ayudar a las personas en su vida diaria en sus hogares o como asistentes para compensar limitaciones físicas y mentales. El grupo, con diferencia, más numeroso de robots de servicios personales está formado por aspiradoras domésticas; Sólo se han vendido más de 3 millones de iRobot Roomba en todo el mundo y el mercado está creciendo más del 60 % al año. Además, se han desplegado un gran número de robots para aplicaciones de ocio como mascotas artificiales (AIBO), muñecas,

etc. Con más de 2 millones de unidades vendidas en los últimos cinco años, el mercado de este tipo de robots de ocio está creciendo exponencialmente y se espera que siga siendo uno de los más prometedores en robótica. En la figura 2 se muestran varios sistemas típicos de robots de servicio personal.

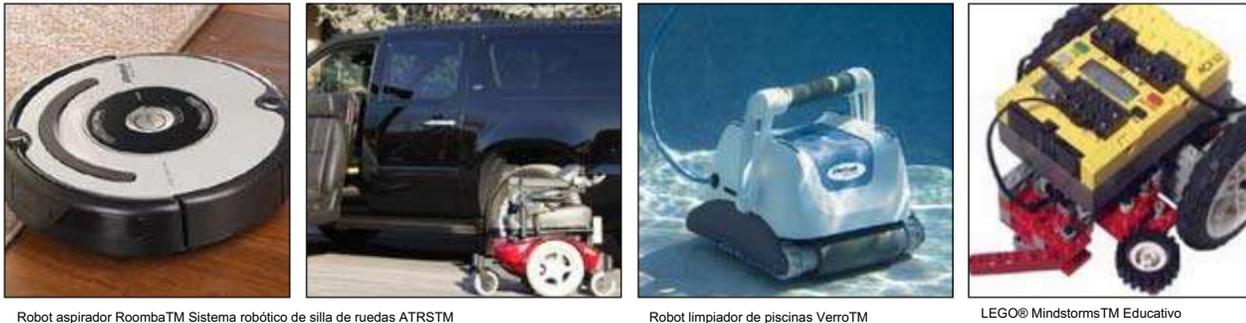


Figura 2: Robots de servicio típicos para aplicaciones personales.

El panel de robots de servicio incluía tanto servicios profesionales como personales y, como tal, cubría un conjunto muy diverso de aplicaciones y problemas.

## 2. Hallazgos Estratégicos

Después de mucha discusión, hubo un acuerdo general entre los presentes en la reunión de que todavía faltan entre 10 y 15 años para una amplia variedad de aplicaciones y soluciones que incorporen funcionalidad autónoma general a gran escala. Algunas de las cuestiones tecnológicas clave que deben abordarse para llegar a ese punto se analizan en una sección posterior de este informe. Sin embargo, hubo acuerdo entre los presentes en que la tecnología ha progresado lo suficiente como para permitir un número cada vez mayor de soluciones semiautónomas y/o de escala limitada que son pragmáticas, asequibles y proporcionan valor real.

Ya han comenzado a surgir productos y aplicaciones comerciales basados en la tecnología existente y se esperan más a medida que los empresarios e inversores se den cuenta de su potencial. Los participantes identificaron varios mercados donde están surgiendo estas primeras soluciones comerciales y donde la robótica de servicios probablemente tendrá el mayor impacto. Entre las áreas identificadas se encuentran atención médica, infraestructura nacional y gestión de recursos, energía y medio ambiente, seguridad, transporte y logística, y educación y entretenimiento.

Uno de los factores clave que contribuyen a las tendencias identificadas es el envejecimiento de nuestra población. Esto afecta a la robótica de servicios tanto en términos de la necesidad de abordar una fuerza laboral cada vez menor como de la oportunidad de desarrollar soluciones que satisfagan sus necesidades de atención médica. Como se muestra en el gráfico 3, Estados Unidos se encuentra en el umbral de una tendencia de 20 años que verá casi duplicarse el número de trabajadores jubilados como porcentaje de la fuerza laboral actual; de poco más de 2 jubilados por cada 10 trabajadores en la actualidad a poco más de 4 jubilados por cada 10

trabajadores en 2030. En Japón, la situación es aún peor y ha impulsado una importante iniciativa nacional para desarrollar la tecnología robótica necesaria para ayudar a cuidar a su población que envejece rápidamente. . En términos generales, se espera que la robótica de servicios profesionales sirva como multiplicador de la fuerza laboral para un mayor crecimiento económico, mientras que se espera que la robótica de servicios domésticos permita una autonomía personal sostenida.

Estados Unidos  
está en el umbral  
de una tendencia  
de 20 años  
que verá casi  
duplicarse el  
número de  
trabajadores jubilados  
como porcentaje de la fuerza labor

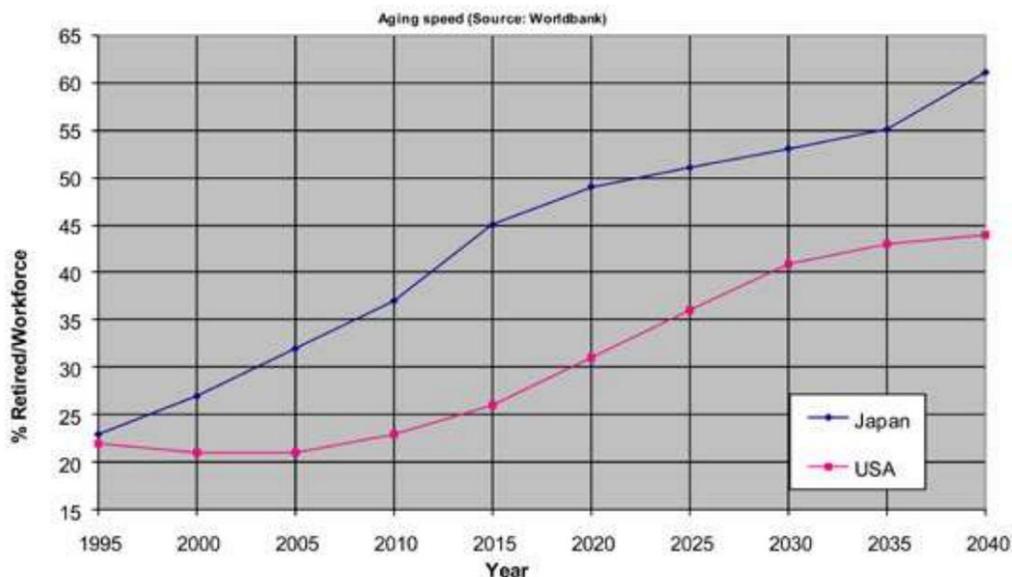


Figura 3. Los cambios demográficos en EE.UU. y Japón respectivamente.

Si bien el aumento de la productividad y la reducción de costos son el denominador común de la robótica de servicios, se espera que cada sistema proporcione de manera única una solución convincente a ciertos problemas o necesidades críticas específicas del mercado. Por ejemplo, un factor clave y principal en el uso de la tecnología robótica para automatizar las fábricas de automóviles fue el deseo de obtener una calidad constante en el día a día y evitar el síndrome de "construido el lunes".

## 2.1. Principales mercados e impulsores

**Atención médica y calidad de vida:** la aplicación actual de la tecnología robótica para proporcionar soluciones teleoperadas, como el sistema quirúrgico daVinci de Intuitive Surgical, representa la punta del iceberg.

La tecnología robótica tiene un enorme potencial para ayudar a controlar los costos, empoderar a los trabajadores de la salud y permitir que los ciudadanos mayores vivan más tiempo en sus hogares.

**Energía y Medio Ambiente** - Los asistentes identificaron estos dos temas estrechamente relacionados como críticos para el futuro de nuestro país y maduros para el surgimiento de aplicaciones de tecnología robótica, especialmente en las áreas de automatización de la adquisición de energía y monitoreo del medio ambiente.

**Fabricación y logística:** más allá de la aplicación tradicional de la tecnología robótica para automatizar ciertas funciones de la línea de ensamblaje, los participantes de la reunión coincidieron en que existe un enorme potencial para automatizar aún más la fabricación y el movimiento de mercancías; como se explora plenamente en el esfuerzo paralelo de elaboración de hojas de ruta en esta área. En particular, la tecnología robótica promete transformar las operaciones de fabricación a pequeña escala, o "micro", y en el proceso ayudar a acelerar la transición de la fabricación de regreso a Estados Unidos. Desde entonces, esta creencia se ha visto corroborada por la formación de una nueva empresa de robótica, Heartland Robotics, organizada específicamente para ese propósito.

**Automoción y transporte:** aunque todavía faltan décadas para que llegue el automóvil totalmente autónomo, la tecnología robótica ya está apareciendo en forma de sistemas avanzados de asistencia al conductor y prevención de colisiones. El transporte público es otra área que se espera que se automatice cada vez más. A medida que la tecnología robótica siga mejorando y madurando, los sistemas y soluciones de transporte no tripulado desarrollados para entornos de escala limitada, como los aeropuertos, se adaptarán para su implementación en centros urbanos y otros entornos de uso general.

Seguridad Nacional y Protección de Infraestructura - Los participantes en la reunión coincidieron en que la tecnología robótica ofrece un enorme potencial para aplicaciones en protección fronteriza, búsqueda y rescate, inspección y seguridad portuaria y otras áreas relacionadas. Además, se espera que la tecnología robótica se utilice cada vez más para automatizar la inspección, el mantenimiento y la protección de los puentes, carreteras, sistemas de agua y alcantarillado, tuberías e instalaciones de energía y otros componentes críticos de la infraestructura de nuestra nación.

Entretenimiento y educación: esta área, quizás más que cualquier otra, ha visto la aparición temprana de productos habilitados para tecnología robótica. En particular, la robótica tiene el potencial de abordar significativamente la crisis de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas ("STEM") que enfrenta la nación y convertirse en la verdadera "cuarta r" de la educación. Prueba de ello es el tremendo éxito de FIRST, una organización sin fines de lucro fundada en 1999 que organiza competencias nacionales de robótica para inspirar a los jóvenes a ser líderes en ciencia y tecnología, y otras iniciativas educativas inspiradas en la robótica. La robótica brinda a los niños una vía táctil y convincente para aprender y aplicar tanto los fundamentos clave de matemáticas y ciencias subyacentes como los principios de ingeniería e integración de sistemas necesarios para producir máquinas inteligentes para cumplir ciertas misiones.

## 2.2. Oportunidades a corto plazo y factores que afectan la comercialización

Se requiere una inversión significativa para ampliar la investigación y el desarrollo de la tecnología robótica si se quiere hacer realidad la promesa de lo que se puede lograr en cada una de las áreas mencionadas. Como se señaló anteriormente, todavía estamos muy lejos de la tecnología robótica totalmente autónoma necesaria para automatizar procesos hasta el punto de que no requiera atención o intervención humana. Dicho esto, la opinión colectiva de los asistentes fue que se ha logrado suficiente progreso en la tecnología robótica para permitir el desarrollo y comercialización de una amplia variedad de aplicaciones y productos iniciales en cada una de estas áreas para alcanzar niveles significativos de "aumento humano". .

Dichas soluciones serán capaces de realizar en distintos grados automáticamente los siguientes tipos de funciones: monitorear entornos físicos definidos pero dinámicos, identificar objetos, detectar cambios o percibir de otro modo el estado de sus entornos asignados, analizar y recomendar acciones que se deben tomar en respuesta a condiciones detectadas, tomar tales acciones en respuesta a comandos humanos y/o realizar automáticamente dichas acciones dentro de ciertos límites preautorizados que no son anulados por operadores humanos.

Ejemplos de este tipo de soluciones robóticas actuales incluyen sistemas teleoperados como el sistema quirúrgico daVinci y herramientas de productividad autónomas y especializadas como Roomba. A medida que Internet siga evolucionando, inspirará una progresión natural desde sentir a distancia hasta actuar a distancia.

Esta extensión de Internet al mundo físico servirá para desdibujar aún más los límites entre comunidad, comunicación, informática y servicios e inspirará nuevas dimensiones en las aplicaciones de teletrabajo y telepresencia. Es probable que surjan soluciones híbridas que permitan la cognición humana distribuida y el uso eficiente de la inteligencia humana. Dichas soluciones combinarán la capacidad habilitada por la robótica para percibir de forma remota y autónoma situaciones que requieren intervención con la capacidad habilitada por Internet para que los operadores humanos tomen medidas a distancia sólo cuando sea necesario.

Como se mencionó anteriormente, el envejecimiento de nuestra población resultará en una escasez de mano de obra en el futuro. A medida que los trabajadores busquen ascender en la jerarquía laboral, habrá una creciente necesidad de aumentar y automatizar cada vez más los trabajos en la base porque los trabajadores para realizarlos pueden no estar fácilmente disponibles y eventualmente pueden no existir. Si bien el desafío de lograr soluciones totalmente autónomas a largo plazo sigue siendo principalmente tecnológico, el desafío a corto plazo es invertir en la ciencia del desarrollo.

requisitos y determinar de otro modo la mejor manera de “cruzar el abismo”; se trata de identificar las propuestas de valor correctas, reducir los costos, desarrollar procesos de ingeniería de sistemas eficientes y efectivos, determinar cómo integrar mejor dichas soluciones en soluciones actuales o adaptadas y, de otro modo, abordar la brecha de conocimientos técnicos de la transición de la tecnología a los productos.

## 2.3. Retos científicos y técnicos

Los participantes del taller trabajaron en tres grupos para identificar los desafíos técnicos y científicos pertinentes a las aplicaciones y los impulsores comerciales descritos en la sección anterior. El primer grupo de trabajo se centró en el diseño de aplicaciones y sistemas; el segundo grupo discutió la acción, la cognición, la planificación y otros elementos de la inteligencia robótica; y el grupo final identificó desafíos en la interacción entre humanos y robots. Esta sección resume sus hallazgos. Debido a que los desafíos identificados por los tres grupos trascienden los límites entre las respectivas áreas temáticas, presentaremos los desafíos técnicos y científicos identificados por los grupos de trabajo de manera integrada. El énfasis de esta sección está en describir los desafíos, no en trazar una hoja de ruta para abordarlos; dicha hoja de ruta se describirá en la siguiente sección.

### 2.3.1. Movilidad

La movilidad ha sido uno de los casos de éxito de la investigación en robótica. Este éxito se ejemplifica con una serie de sistemas con rendimiento demostrado en entornos del mundo real, incluidos guías turísticos de museos y automóviles de conducción autónoma, como en DARPA Grand Challenge y Urban Challenge.

Sin embargo, los participantes del taller coincidieron en que aún quedaban por resolver varios problemas importantes. Será necesario encontrar soluciones a estos problemas en el ámbito de la movilidad para alcanzar el nivel de autonomía y versatilidad requerido para las áreas de aplicación identificadas.

Los participantes identificaron la navegación 3D como uno de los desafíos más importantes en el ámbito de la movilidad. Actualmente, la mayoría de los sistemas de cartografía, localización y navegación se basan en representaciones bidimensionales del mundo, como mapas de calles o planos de planta. Sin embargo, a medida que las aplicaciones robóticas aumentan en complejidad y se implementan todos los días, habitan entornos que están menos estructurados y menos controlados, estas representaciones 2D no serán suficientes para capturar todos los aspectos del mundo necesarios para las tareas comunes. Por lo tanto, será importante permitir la adquisición de modelos mundiales tridimensionales que apoyen la navegación y la manipulación (ver la siguiente sección). Estas representaciones 3D no sólo deben contener la disposición geométrica del mundo; En cambio, los mapas deben contener información semántica relevante para la tarea sobre objetos y características del entorno. Los robots actuales son buenos para comprender dónde están las cosas en el mundo, pero tienen poca o ninguna comprensión de qué son. Cuando la movilidad se realiza al servicio de la manipulación, las representaciones ambientales también deben incluir las posibilidades de los objetos, es decir, el conocimiento de para qué puede utilizar el robot un objeto. Lograr la navegación semántica en 3D requerirá métodos novedosos de detección, percepción, mapeo, localización, reconocimiento de objetos y reconocimiento de posibilidades. y planificación. Algunos de estos requisitos se analizan con más detalle más adelante en esta sección.

Una de las tecnologías prometedoras hacia el mapeo semántico 3D, según lo identificado por los participantes, es el uso de diferentes tipos de sensores para construir mapas. Actualmente, los robots dependen de sistemas de medición basados en láser de muy alta precisión para aprender sobre su entorno, utilizando algoritmos de mapeo conocidos como algoritmos "SLAM". Los participantes identificaron el deseo de pasar de los láseres a las cámaras, para desarrollar un nuevo campo de “visual SLAM” (VSLAM). Esta tecnología se basa en cámaras, que son sensores robustos, baratos y fácilmente disponibles, para mapear y localizar en un mundo tridimensional. Hoy en día, los sistemas VSLAM muestran un impresionante rendimiento en tiempo real. Por lo tanto, los participantes consideraron que VSLAM probablemente desempeñará un papel en el desarrollo de capacidades de navegación 3D adecuadas y más asequibles.

Los participantes identificaron requisitos adicionales para la navegación 3D que serán fundamentales para cumplir con los requisitos de las aplicaciones específicas. La navegación 3D en exteriores plantea una serie de desafíos importantes que deben abordarse explícitamente. Entre ellos está el hecho de que las representaciones ambientales 2D actuales no pueden capturar la complejidad de los entornos exteriores ni las condiciones de iluminación cambiantes que causan una variabilidad sustancial en el rendimiento de las modalidades de sensores. Los participantes también identificaron una navegación sólida entre multitudes como un importante desafío de movilidad.

### 2.3.2. Manipulación

Se necesitan avances sustanciales en la manipulación para casi todas las aplicaciones de robótica de servicios identificadas en la sección anterior. Estas aplicaciones requieren que un robot interactúe físicamente con su entorno abriendo puertas, recogiendo objetos, operando máquinas y dispositivos, etc. Actualmente, los sistemas de manipulación autónomos funcionan bien en entornos cuidadosamente diseñados y altamente controlados, como plantas de fábrica y celdas de ensamblaje, pero no pueden manejar la variabilidad ambiental y la incertidumbre asociadas con entornos abiertos, dinámicos y no estructurados. Como resultado, los participantes de los tres grupos identificaron la manipulación autónoma como un área crítica de la investigación científica. Si bien no se identificaron direcciones específicas para el progreso, las discusiones revelaron que los supuestos básicos de la mayoría de los algoritmos de manipulación existentes no se cumplirían en las áreas de aplicación a las que se dirige este esfuerzo. La comprensión y manipulación adecuadas para aplicaciones en entornos abiertos, dinámicos y no estructurados deben aprovechar el conocimiento y los modelos previos del entorno siempre que sea posible, pero no deben fallar catastróficamente cuando dicho conocimiento previo no esté disponible. Como corolario, la manipulación verdaderamente autónoma dependerá de la capacidad del robot para adquirir modelos ambientales adecuados y relevantes para la tarea cuando no estén disponibles. Esto implica que, a diferencia de la mayoría de los métodos existentes que enfatizan la planificación y el control, la percepción se convierte en un componente importante de la agenda de investigación hacia la manipulación autónoma.

Los participantes identificaron nuevas manos robóticas (discutidas en la subsección sobre Hardware), sensores táctiles (consulte Sensores y percepción) y simuladores físicamente realistas y de alta precisión como facilitadores importantes para la manipulación autónoma.

El participante sugirió que las operaciones competentes de “seleccionar y colocar” pueden proporcionar una base funcional suficiente para los requisitos de manipulación de muchas de las aplicaciones específicas. Por lo tanto, se sugirió que las operaciones de selección y colocación de creciente complejidad y generalidad podrían proporcionar una hoja de ruta y un punto de referencia para los esfuerzos de investigación en manipulación autónoma.

**Se necesitan avances  
sustanciales en la manipulación  
para casi todas las aplicaciones de la  
robótica de servicios.**

---

### 2.3.3. Planificación

La investigación en el área de la planificación del movimiento ha logrado avances notables durante la última década. Los algoritmos y técnicas resultantes han impactado muchas áreas de aplicación diferentes. Sin embargo, los participantes coincidieron en que la planificación sólida de rutas dinámicas en 3D sigue siendo un problema abierto. Un aspecto importante de este problema es la idea de la conciencia situacional de un robot, es decir, la capacidad del robot para combinar, intercalar e integrar de forma autónoma la planificación de acciones con la detección y el modelado adecuados del entorno. El término “apropiado” alude a que el robot no puede adquirir modelos completos y exactos del entorno en tiempo real. En cambio, será necesario razonar sobre los objetivos, el entorno y las acciones motoras y de detección disponibles para el robot.

Como resultado, la frontera entre planificación y planificación del movimiento se difumina. Para planificar una moción, el

El planificador tiene que coordinar la detección y el movimiento bajo las limitaciones impuestas por la tarea. Para lograr los objetivos de la tarea de manera sólida y confiable, la planificación debe considerar las posibilidades ambientales.

Esto significa que el planificador debe considerar las interacciones con el entorno y los objetos que contiene como parte del proceso de planificación. Por ejemplo: para recoger un objeto, puede ser necesario abrir una puerta para pasar a otra habitación, empujar una silla para poder alcanzar un gabinete, abrir la puerta del gabinete y empujar un objeto que obstruye hacia afuera del camino. En este nuevo paradigma de planificación, la tarea y las limitaciones impuestas por la tarea y el entorno son el centro de atención; el "movimiento" de la "planificación del movimiento" es un medio para lograr un fin. Las limitaciones consideradas durante la planificación pueden surgir de la manipulación de objetos, la locomoción (por ejemplo, planificación de pasos), limitaciones cinemáticas y dinámicas del mecanismo, limitaciones posturales o evitación de obstáculos. La planificación bajo estas limitaciones debe realizarse en tiempo real.

Algunas de las restricciones al movimiento del robot se aplican más fácilmente aprovechando la retroalimentación del sensor. Ejemplos obvios son las limitaciones de contacto y la evitación de obstáculos. El área de la planificación de la retroalimentación y la integración del control y la planificación son, por lo tanto, áreas importantes de investigación para satisfacer los requisitos de planificación identificados por los participantes. Un planificador de retroalimentación genera una política que asigna directamente estados a acciones, en lugar de generar un camino o trayectoria específica. Esto garantiza que las incertidumbres de los sensores, la actuación y el modelado puedan abordarse adecuadamente mediante la retroalimentación sensorial.

La creciente complejidad de la planificación en este contexto también requerirá formas novedosas de capturar las descripciones de las tareas. Mientras que en la planificación del movimiento clásica la especificación de dos configuraciones especificaba completamente una tarea de planificación, la visión de la planificación aquí descrita tiene que manejar representaciones de tareas mucho más ricas para abordar la riqueza de las tareas de manipulación y las interacciones intermedias con el entorno.

Los participantes también se dan cuenta de la necesidad de métodos formales para realizar la verificación y validación de los resultados de los planificadores. Estas garantías pueden ser necesarias para garantizar el funcionamiento seguro de los robots en entornos poblados por humanos.

### 2.3.4. Sensación y percepción

Los sentidos y la percepción son de importancia central para todos los aspectos de la robótica, incluida la movilidad, la manipulación y la interacción entre humanos y robots. Los participantes estaban convencidos de que la innovación en los sentidos y la percepción tendrá un profundo impacto en el ritmo de progreso de la robótica.

Los participantes creían que nuevas modalidades de detección, así como versiones más avanzadas, de mayor resolución y de menor costo de las modalidades existentes, serían áreas de importantes avances. Por ejemplo, los participantes esperan avances importantes en manipulación y movilidad a partir de la detección de rangos 3D densos, posiblemente mediante LIDAR. Es probable que los avances en la manipulación diestra requieran sensores táctiles similares a la piel para manos robóticas. Pero los participantes también discutieron sobre sensores especializados, por ejemplo para seguridad, llamados sensores de seguridad. Estos sensores podrían adoptar diversas formas, como detección de alcance o calor para detectar la presencia de humanos, o podrían implementarse mediante sensores de par especiales como parte del mecanismo de actuación, capaces de detectar un contacto inesperado entre el robot y su entorno. En esta categoría también entrarían los sensores similares a la piel para todo el mecanismo robótico.

Los datos proporcionados por las modalidades de sensores deben procesarse y analizarse mediante algoritmos de percepción en entornos complejos y altamente dinámicos en condiciones variables, incluidas las diferencias entre el día y la noche y factores oscurecedores como la niebla, la neblina, la luz solar intensa y similares. Los participantes identificaron la necesidad de avanzar en el modelado, la detección y el reconocimiento de objetos de alto nivel, en una mejor comprensión de la escena y en una mejor capacidad para detectar actividades e intenciones. Se requieren algoritmos novedosos para el reconocimiento de la capacidad de pago para respaldar el tipo de planificación descrito en la subsección anterior.

Los participantes también discutieron la necesidad de contar con modelos de sensores precisos que respalden los algoritmos de percepción.

### 2.3.5. Arquitecturas, cognición y paradigmas de programación

Los debates sobre los temas de movilidad, manipulación, planificación y percepción revelaron que estos temas no pueden verse de forma aislada, sino que están estrechamente vinculados entre sí. La cuestión de cómo diseñar un sistema para integrar eficazmente habilidades específicas de esas áreas para lograr un comportamiento seguro, robusto, dirigido a tareas o incluso inteligente sigue siendo una cuestión abierta de importancia fundamental en la robótica. La investigación hacia este objetivo se ha llevado a cabo bajo el nombre de arquitecturas, cognición y paradigmas de programación. Esta diversidad de enfoques o incluso puntos de vista filosóficos puede reflejar la falta de comprensión en la comunidad sobre cómo abordar adecuadamente este desafío. Esta diversidad de puntos de vista también se refleja en la diversidad de herramientas que actualmente se utilizan para abordar esta cuestión: van desde el aprendizaje por imitación hasta la programación explícita de las llamadas arquitecturas cognitivas. Algunos participantes sintieron que probablemente sería necesaria una combinación de estos para lograr el resultado deseado.

Uno de los enfoques clásicos hacia la cuestión general de generar un comportamiento robusto y autónomo es el circuito sentido/plan/actuación que suelen emplear los sistemas de control modernos. Mientras sentido/plan/ Aunque este hecho ha sido una constante en la investigación de la robótica durante las últimas décadas, algunos participantes sintieron que los enfoques novedosos probablemente se desviarían de este enfoque en su forma más simple. Las posibles alternativas son múltiples bucles anidados o jerárquicos, el enfoque basado en el comportamiento, combinaciones de ambos o posiblemente incluso enfoques completamente novedosos.

Todos los participantes coincidieron en que esta área de investigación requerirá una atención y un progreso sustanciales en el camino hacia los sistemas robóticos autónomos.

### 2.3.6. Interacción robot humano (HRI)

Dado el objetivo final de implementar robots móviles y diestros en entornos humanos para permitir la coexistencia y la cooperación, se requerirán avances sustanciales en el área de la interacción entre humanos y robots. Estas interacciones también podrían convertirse en un componente importante de un enfoque global para lograr un comportamiento robusto de los robots, como se analizó en la subsección anterior. Los robots pueden aprender nuevas habilidades a partir de sus interacciones con los humanos, pero en todas las circunstancias deben ser conscientes de las características y requisitos de su comunicación con los humanos.

Además de los modos de comunicación (verbal, no verbal, gestos, expresión facial, etc.), los participantes identificaron una serie de temas de investigación importantes, incluidas las relaciones sociales, las emociones (reconocimiento, presentación, cognición/modelado socioemocional), compromiso y confianza.

Una comprensión de estos aspectos de la comunicación entre humanos y robots debería conducir a una estructuración automática de las interacciones entre humanos y robots, donde la capacidad de los sistemas robóticos para operar de forma independiente aumenta o disminuye a medida que tanto la tarea como la interacción del supervisor humano con el sistema cambian automáticamente.

El progreso hacia estos objetivos dependerá de dispositivos de entrada eficaces e interfaces de usuario intuitivas. Los participantes también abogaron por el desarrollo de una variedad de plataformas para estudiar HRI, incluidos robots humanoides, plataformas de manipulación móviles, sillas de ruedas, exoesqueletos y vehículos.

Los participantes identificaron un ciclo de diseño/construcción/implementación en el que debería progresar la investigación del HRI. El proceso de diseño debe considerar las aportaciones de varias comunidades relevantes, incluida la comunidad de investigación básica y los usuarios finales. El proceso de construcción integra numerosos componentes e hilos de investigación en un solo sistema; Aquí existe una oportunidad para colaboraciones industriales y transferencia de tecnología. Finalmente, el sistema integrado se implementa en un contexto del mundo real. Los participantes sugirieron la noción de una Ciudad Robot (ver la siguiente subsección) como una idea prometedora para evaluar HRI en un contexto del mundo real. El ciclo se cierra incorporando los comentarios del usuario final en el diseño experimental de la siguiente iteración del ciclo de diseño/construcción/implementación.

### 2.3.7. Infraestructura de investigación

Los participantes del taller sintieron firmemente que el rápido progreso hacia los objetivos científicos identificados dependerá fundamentalmente de la amplia disponibilidad de una infraestructura de investigación adecuada, incluidos hardware y software. Para abordar los desafíos de investigación mencionados anteriormente, será necesario construir plataformas robóticas que combinen muchos componentes mecánicos avanzados e interactivos, proporcionando capacidades adecuadas de movilidad, manipulación y detección. Estas plataformas estarán controladas por una multitud de componentes de software desarrollados de forma independiente pero que funcionarán de forma interdependiente. Como resultado, estas plataformas robóticas integradas exhiben un grado de complejidad que va más allá de lo que muchos grupos de investigación que operan de forma independiente pueden diseñar, desarrollar, probar y mantener fácilmente. La falta de estandarización de las plataformas de hardware y software también puede resultar en una fragmentación de la comunidad de investigación, dificultades para evaluar la validez y generalidad de los resultados publicados y la replicación de muchos esfuerzos innecesarios de ingeniería e integración.

Para superar estos desafíos, los participantes del taller abogaron por esfuerzos comunitarios coordinados para el desarrollo de sistemas de hardware y software. Estos esfuerzos deberían incluir el desarrollo de una plataforma experimental abierta que, preferiblemente a bajo costo, respalde una amplia gama de esfuerzos de investigación, por un lado, y al mismo tiempo permita la reutilización de tecnología y software entre grupos de investigación, por el otro. Un ejemplo de dicha plataforma abierta es ROS, un sistema operativo robótico desarrollado por Willow Garage que permite la reutilización de código y proporciona los servicios que uno esperaría de un sistema operativo, como control de dispositivos de bajo nivel, implementación de funcionalidades de uso común, y el paso de mensajes entre procesos. Idealmente, dichas plataformas se complementarían con software de simulación física para respaldar el desarrollo temprano y las pruebas de algoritmos sin comprometer la seguridad de los investigadores y el hardware. Los esfuerzos de desarrollo también podrían beneficiarse de los entornos de desarrollo integrados (IDE) robóticos; Estos IDE impulsaron la modularidad en el desarrollo de software, facilitando así la reutilización y la documentación.

Los participantes señalaron que la investigación en robótica rara vez se evalúa y prueba exhaustivamente en experimentos repetibles y bien definidos. Otros campos, como la visión por computadora, se han beneficiado enormemente de los conjuntos de datos disponibles públicamente, que permitieron una comparación objetiva entre múltiples algoritmos y sistemas. Por lo tanto, los participantes sugirieron la creación y ampliación de depósitos de datos experimentales, que luego podrían servir como puntos de referencia para toda la comunidad. Sin embargo, como gran parte de la investigación en robótica se centra en la interacción física entre el robot y su entorno, los conjuntos de datos electrónicos no son fiables. Deberían complementarse con puntos de referencia específicos de habilidades que consistan en objetos físicos. Por ejemplo, se pueden seleccionar una serie de objetos fácilmente disponibles como punto de referencia para comprender la investigación. Además, se sugirieron entornos de referencia completos para desarrollar, evaluar y comparar su desempeño con respecto a una aplicación o implementación en particular.

Estos entornos pueden variar en tamaño y complejidad, desde un simple espacio de trabajo (un escritorio de oficina o un mostrador de cocina) hasta una habitación entera, una casa o una manzana entera. En este contexto, se mencionó la noción de Ciudad Robot: un entorno urbano normal en el que todos los residentes son parte del experimento y ayudan en el proceso de evaluación, así como en la determinación de los requisitos adecuados para los entornos de aplicación cotidianos.

Muchos de los esfuerzos propuestos (y en particular los esfuerzos de integración de hardware o software) quedan fuera del alcance de los programas de financiación existentes. Los participantes señalaron que sería necesario un cambio de política a este respecto para garantizar que la disponibilidad de infraestructura de investigación no represente un obstáculo en el progreso hacia sistemas robóticos autónomos en entornos cotidianos.

### 2.3.8. hardware mecánico

La seguridad es un factor crítico para el despliegue de sistemas robóticos en entornos humanos. Los robots inherentemente seguros también permitirían modos de interacción entre humanos y robots que pueden aumentar la aceptación de la tecnología robótica en la vida cotidiana. Por lo tanto, los participantes consideraron que motores y mecanismos intrínsecamente más seguros con una mayor relación resistencia-peso representarían una importante tecnología habilitadora. En tales mecanismos el cumplimiento variable sería una propiedad deseable. El concepto de cumplimiento variable se refiere a la capacidad de un mecanismo para ajustar su comportamiento a las fuerzas de reacción al entrar en contacto con el medio ambiente. Estas fuerzas de reacción pueden variar para diferentes tareas. Dichos mecanismos permiten un funcionamiento seguro, especialmente al interactuar con humanos, así como un movimiento flexible, robusto y competente en contacto con el medio ambiente. Además, se identificó la eficiencia energética como una preocupación crítica para muchas aplicaciones, ya que los robots tendrán que funcionar sin ataduras durante largos períodos de tiempo. Por último, se necesitan modos de locomoción novedosos o mejorados más allá de las ruedas para permitir un funcionamiento seguro y fiable en entornos interiores y exteriores. Los entornos exteriores a menudo exhiben propiedades del terreno muy variables, mientras que los interiores pueden contener escaleras, rampas, escaleras mecánicas o ascensores.

Los participantes identificaron como un área importante de investigación las manos robóticas altamente diestras y fácilmente controlables. Es muy probable que los avances en el agarre y la manipulación robóticos vayan de la mano del desarrollo de nuevos mecanismos manuales. Al mismo tiempo, los participantes sintieron que los algoritmos de agarre y manipulación existentes no aprovechaban plenamente el potencial de la tecnología manual actual. Por lo tanto, es inconcebible que muchas aplicaciones interesantes y relevantes puedan abordarse con el dominio y manipulación del hardware disponible.

## 3. Desafíos/capacidades clave

### 3.1. Escenarios motivadores

#### 3.1.1. Calidad de vida

Se espera que la tecnología robótica haga una enorme contribución a las vidas de las personas mayores y discapacitadas. Un ejemplo de una aplicación existente es una solución revolucionaria de movilidad en el transporte que permite a las personas con movilidad limitada que utilizan sillas de ruedas entrar y salir de sus vehículos de forma independiente y cargar y descargar sus sillas de ruedas de forma remota desde una amplia gama de vehículos. Este sistema hace posible que quienes dependen de sillas de ruedas transporten su silla de ruedas utilizando una camioneta de pasajeros común y accedan a ella cuando sea necesario sin la ayuda de otras personas, ofreciéndoles un grado de libertad e independencia que hasta ahora no estaba disponible. Este sistema proporciona beneficios significativos sobre las soluciones de movilidad de transporte existentes, incluido un menor costo de propiedad, la capacidad de utilizar asientos automotrices estándar sometidos a pruebas de choque, una mayor variedad de vehículos, no se requieren modificaciones estructurales y la capacidad de reinstalarlo en vehículos posteriores.



Sistema robótico de silla de ruedas ATRSTM

### 3.1.2. Agricultura

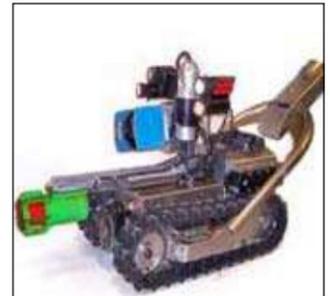
Se espera que la tecnología robótica tenga un impacto en innumerables aplicaciones en la agricultura y aborde la lucha constante de los agricultores por mantener bajos los costos y alta la productividad. Las cosechadoras mecánicas y muchas otras máquinas agrícolas requieren conductores expertos para trabajar con eficacia, mientras que factores como los costos de mano de obra y del operador aumentan los gastos de fatiga y limitan la productividad de estas máquinas. La automatización de operaciones como la fumigación de cultivos, la cosecha y la recolección ofrece la promesa de costos reducidos, mayor seguridad, mayores rendimientos, mayor flexibilidad operativa, incluidas las operaciones nocturnas, y un uso reducido de productos químicos. Se han desarrollado varios prototipos de sistemas y aplicaciones, incluida la fumigación automatizada de cultivos frutales y la cosecha en el campo, y la tecnología ha madurado hasta el punto en que está lista para realizar la transición a una mayor comercialización y despliegue en el campo en los próximos años.



Tractor autónomo

### 3.1.3. Infraestructura

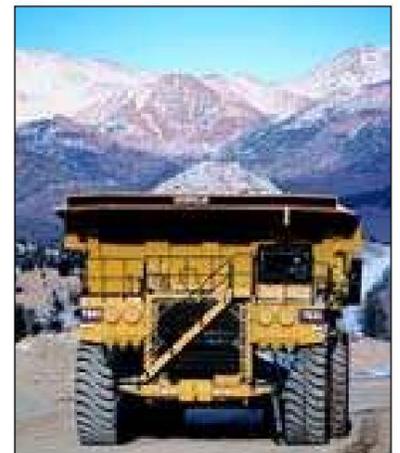
La tecnología robótica tiene un enorme potencial para automatizar la inspección y el mantenimiento de los puentes, carreteras, oleoductos y otras infraestructuras de nuestra nación. La tecnología ya se ha adaptado para desarrollar sistemas automatizados de inspección de tuberías que reducen los costos de mantenimiento y rehabilitación al proporcionar información precisa y detallada sobre el estado de las tuberías. Dichos sistemas, basados en tecnología avanzada de sensores múltiples y otras tecnologías robóticas, están diseñados para estructuras subterráneas y condiciones que de otro modo serían difíciles de inspeccionar, incluidas tuberías de gran diámetro, tramos de largo recorrido, invertidos, coronas, alcantarillas y pozos de registro, y en servicio. inspecciones. Estas plataformas robóticas navegan por esta infraestructura crítica de aguas residuales para inspeccionar tuberías de alcantarillado inalcanzables por medios tradicionales y producir imágenes 3D muy precisas de la superficie interior de la tubería. La información de inspección, capturada en forma digital, sirve como base para futuras inspecciones y, como resultado, puede calcular automáticamente los cambios de características defectuosas a lo largo del tiempo.



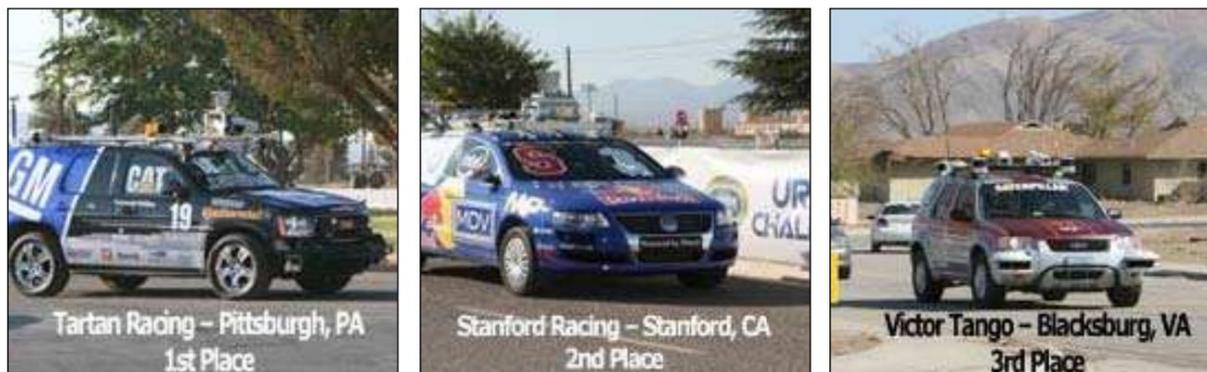
Robot de tuberías ResponderTM

### 3.1.4. Minería

La tecnología robótica ya está empezando a tener un impacto dramático tanto en la industria minera subterránea como en la de superficie. En varias minas de carbón subterráneas se utiliza a diario un innovador sistema de inspección de cintas que utiliza un sistema de "visión artificial" de alta velocidad y algoritmos de software para monitorear el estado de las cintas transportadoras y ayudar a los operadores a detectar defectos. El sistema patentado está diseñado para reducir el costoso tiempo de inactividad causado por la degradación y eventual ruptura de los empalmes de la cinta transportadora. A mayor escala, se está utilizando tecnología robótica para desarrollar versiones autónomas de grandes camiones de transporte utilizados en operaciones mineras. Caterpillar anunció recientemente que está desarrollando un sistema de transporte minero autónomo con planes de integrar camiones de acarreo autónomos, cada uno con capacidades de carga útil de 240 toneladas o más, en algunos sitios mineros para el año 2010. La tecnología autónoma está diseñada para proporcionar ganancias de productividad a través de una mayor consistencia en procesos y minimizar el impacto ambiental mediante una mayor eficiencia y seguridad minera general.



Camión de acarreo autónomo



Los tres primeros clasificados en el DARPA Urban Grand Challenge 2008

### 3.1.5. Transporte

La tecnología robótica afectará significativamente todos los aspectos de la forma en que transportamos personas y mercancías en las próximas décadas; Desde sistemas de transporte personal hasta autopistas inteligentes y sistemas de transporte público autónomos. Empresas como Segway y Toyota han introducido robots de transporte personal que se conducen en posición de pie y son controlados por sensores internos que monitorean constantemente la posición del usuario y realizan automáticamente los ajustes correspondientes. Mientras tanto, los fabricantes de automóviles y de dispositivos están creando "automóviles inteligentes" instalando computadoras y sensores más potentes, lo que brinda a los conductores una mejor idea de su entorno y el rendimiento del automóvil.

Aunque los conductores estadounidenses recorren casi el doble de millas (1,33 billones por año) que hace 25 años, la capacidad de las carreteras por las que circulan ha aumentado sólo un 5 por ciento, lo que ha resultado en 3.700 millones de horas de retrasos para los conductores y 2.300 millones de galones de agua. Combustible desperdiciado. Para abordar este problema, las agencias de carreteras están intentando crear "carreteras inteligentes" mediante la instalación de sensores, cámaras y lectores de peaje automáticos, y se ha lanzado una iniciativa nacional público-privada llamada Integración de Infraestructura Vehicular (VII) para fusionar automóviles inteligentes y carreteras inteligentes para crear una red virtual de información de tráfico y acabar con los atascos. También se espera que los sistemas de transporte masivo adopten tecnología robótica para brindar a los operadores una mayor conciencia situacional y asistencia a la navegación en corredores urbanos concurridos, ayudando así a controlar los costos y aumentar la seguridad.

### 3.1.6. Educación

La robótica ya ha comenzado a transformar las aulas estadounidenses. La robótica pone los conceptos académicos en contexto y se utiliza en todos los niveles desde K-12 y educación universitaria. La robótica proporciona a los estudiantes un medio táctil e integrado para investigar conceptos básicos en matemáticas, física, informática y otras disciplinas STEM, al tiempo que permite a los profesores introducir conceptos sobre diseño, innovación, resolución de problemas y trabajo en equipo. Se ha desarrollado un plan de estudios de robótica, se ha capacitado a los maestros y cada año se llevan a cabo decenas de competencias en todo el país. Quizás los programas de competencia de robótica más conocidos sean los dirigidos por FIRST, una organización sin fines de lucro fundada en 1999 para inspirar a los jóvenes a ser líderes en ciencia y tecnología. Como medida de la creciente popularidad de las competencias de robótica, FIRST espera que más de 195.000 estudiantes participen en sus competencias el próximo año. Aún más significativo es que una encuesta reciente de la Universidad Brandeis encontró que los participantes de FIRST tienen más del doble de probabilidades de seguir una carrera en ciencia y tecnología que los estudiantes que no pertenecen a FIRST y tienen antecedentes similares.



Participantes de First Lego League™

y experiencias académicas. Aunque se han logrado muchos avances, sólo se ha añadido la superficie en términos del impacto potencial de la robótica en la educación. Para aprovechar mejor este potencial, es necesario hacer que los robots sean más accesibles, asequibles y fáciles de usar tanto para estudiantes como para profesores.

### 3.1.7. Seguridad y Defensa Nacional

El uso de tecnología robótica para la seguridad y defensa nacional continúa creciendo a medida que la tecnología innovadora ha mejorado la funcionalidad y viabilidad de los esfuerzos de búsqueda y rescate, vigilancia, contramedidas contra explosivos, detección de incendios y otras aplicaciones. Los sistemas no tripulados de vigilancia, detección y respuesta podrán utilizar plataformas robóticas, sensores fijos y redes de comando y control para monitorear y patrullar cientos de millas de terreno fronterizo accidentado, para olfatear y localizar sustancias químicas, biológicas, radiactivas o nucleares. / amenazas explosivas, y inspeccionar



Solicitud de sitio de desastre

grandes perímetros asociados con fronteras, centrales eléctricas o aeropuertos. Dichos sistemas permitirán al personal de seguridad detectar automáticamente amenazas potenciales, echar un primer vistazo de cerca desde una distancia segura y proporcionar interrupciones e interdiciones iniciales en el punto de intrusión, si es necesario. Mientras que en lugares de desastres, incluido el World Trade Center, se han utilizado otros robots "empaquetables" equipados con instrumentos que incluyen cámaras infrarrojas, sensores de visión nocturna y radares de ondas milimétricas, para buscar víctimas.

## 3.2. Hoja de ruta de capacidades

A continuación, identificamos los desafíos clave que deben enfrentarse y las capacidades clave que deben desarrollarse para entregar robots de servicio capaces de abordar los escenarios motivadores antes mencionados. La Figura 4 proporciona una descripción general de la hoja de ruta propuesta y del resto de este documento. La columna derecha del tamaño muestra las áreas de aplicación, muchas de las cuales se describen en los motivadores escenarios de ejemplo anteriores. Sólo se podrán lograr avances de alto impacto en estas áreas de aplicaciones si se dispone de una serie de capacidades para robots de servicio autónomos. Estas capacidades se enumeran a mitad de la investigación y se describen con más detalle en la Sección 3. Para alcanzar el nivel requerido de competencia en esas áreas, se requiere una inversión sostenida en investigación y desarrollo en una serie de áreas y tecnologías de investigación básica. La Figura 4 en la página siguiente muestra estas áreas de investigación y tecnologías en la columna de la izquierda; se describen con más detalle en la Sección 4.

### 3.2.1. Manipulación diestra similar a la humana

Incluso tareas sencillas, como recoger objetos desconocidos, siguen representando importantes desafíos para la investigación. El nivel de destreza y capacidades de razonamiento físico necesarios para la manipulación autónoma en el contexto de la robótica de servicios domésticos y profesionales parece estar muy fuera de alcance. Los problemas apremiantes en esta área incluyen sensores adecuados y capacidades de percepción asociadas, manos diestras y manipuladores seguros, planificación bajo incertidumbre, control avanzado, aprendizaje y transferencia de habilidades, y modelado y simulación.

Algunos participantes creían que la competencia necesaria en manipulación sólo se puede lograr cuando estas diferentes áreas avanzan de manera coordinada y no de forma aislada. Por ejemplo, los novedosos sensores táctiles similares a la piel son muy prometedores para una manipulación diestra con la mano. Sin embargo, carecemos de algoritmos para procesar los datos de dichos sensores. Es concebible que las técnicas de visión por computadora puedan interpretar la información táctil como una imagen y, por lo tanto, sean capaces de calcular datos útiles.

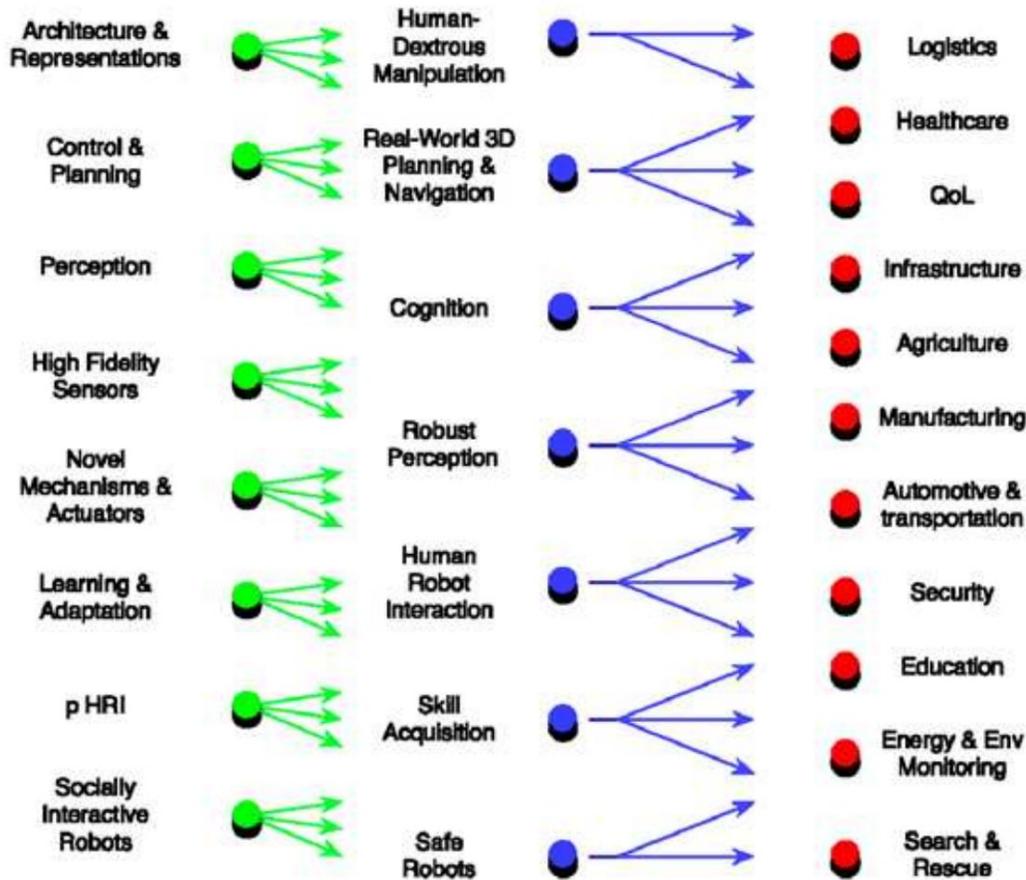


Figura 4. Descripción general de la hoja de ruta para la robótica de servicios domésticos e industriales: la investigación y el desarrollo sostenidos en las áreas de investigación básica en la columna más a la derecha de la figura permitirán una serie de capacidades elementales, que se muestran en la columna central de la figura. Estas capacidades, a su vez, permiten avanzar en las áreas de aplicación de la derecha.

abstracciones de los datos táctiles de alta dimensión. Al mismo tiempo, la inspiración de los algoritmos de visión por computadora puede permitir el diseño de sensores táctiles más simples que contengan un preprocesamiento local simple adaptado a los algoritmos específicos que admiten.

En 5, 10 y 15 años, los siguientes objetivos son posibles con investigación y desarrollo sostenidos:

5 años: Los robots realizan tareas limitadas de recogida y colocación en el hogar y en entornos industriales; Los robots pueden abrir puertas y armarios de forma fiable. Estas tareas de manipulación se logran en parte diseñando el medio ambiente, en parte equipando a los robots con efectores finales especializados (o al menos de propósito no muy general) y haciendo suposiciones simplificadas sobre el medio ambiente.

10 años: Los robots manipulan con fuerza objetos y herramientas grandes, agarrables, rígidos y posiblemente articulados sin poseer modelos a priori. Los robots mejoran la robustez y aplicabilidad de la manipulación y las habilidades de agarre con experiencia. Los robots adquieren conocimientos de manipulación generalizados para darles información sobre el uso de objetos y herramientas, incluso si no los han encontrado antes.

15 años: Los robots poseen manos con niveles de destreza mecánica casi humanos. Las manos están cubiertas con piel táctil de alta resolución. Los robots son capaces de realizar manipulaciones robustas de objetos, basadas en sensores, prensiles y no prensiles. Poseen habilidades rudimentarias para manipular objetos flexibles.

### 3.2.2. Planificación y navegación en 3D del mundo real

Los robots de servicios autónomos realizan tareas moviéndose por su entorno e interactuando con su entorno. Estos movimientos e interacciones necesitan lograr una tarea determinada cambiando la postura del robot y moviendo objetos en el entorno. La realización de una tarea puede requerir secuencias complejas de movimientos e interacciones; Es posible que el robot tenga que moverse de una habitación a otra o que tenga que abrir puertas, quitar obstáculos de su camino, eliminar obstrucciones o utilizar herramientas. Para alcanzar este nivel de competencia, es necesario realizar avances sustanciales en la intersección de la planificación del movimiento, la planificación de tareas y el control. Históricamente, estas áreas han progresado de forma aislada. Sin embargo, los problemas que plantea la robótica de servicios sólo pueden abordarse mediante una estrecha integración de estas técnicas.

Considere la tarea de levantar una taza cuyo acceso está obstruido por una caja. Para razonar sobre empujar la caja hacia un lado para recoger la taza, el robot tiene que razonar sobre sus propias capacidades, la geometría del escenario, las limitaciones impuestas por la actuación y los límites de las articulaciones, la dinámica de contacto y la fricción que surgen al empujar la caja. etc.

Para razonar sobre el mundo de tal manera que pueda determinarse la secuencia apropiada de acciones y movimientos, el robot debe ser consciente de su entorno. No toda la información necesaria se puede proporcionar al robot de antemano, ya que los robots de servicio operan en entornos dinámicos y no estructurados. Por tanto, el robot debe poseer capacidades para percibir y mapear su entorno. El "mapeo semántico" proporciona al robot información sobre el entorno necesario para realizar una tarea. La detección y el reconocimiento de objetos y las habilidades perceptivas relacionadas proporcionan información para el mapeo semántico y la manipulación de objetos.

En 5, 10 y 15 años, los siguientes objetivos son posibles con investigación y desarrollo sostenidos:

5 años: Los robots de los laboratorios de investigación pueden navegar de forma segura y robusta en entornos 2D no estructurados y realizar tareas sencillas de recoger y colocar. Los objetos relevantes pertenecen a un conjunto muy limitado o poseen propiedades específicas. Los robots aprenden mapas semánticos de su entorno a través de la exploración y la interacción, pero también a través de la instrucción de los humanos. Son capaces de razonar sobre tareas de complejidad moderada, como quitar obstrucciones, abrir armarios, etc. para obtener acceso a otros objetos.

10 años: Dado un modelo aproximado y posiblemente incompleto de la parte estática del entorno (posiblemente dado a priori u obtenido de bases de datos a través de Internet, etc.), los robots de servicio son capaces de planificar y ejecutar de forma fiable un movimiento dirigido a una tarea en servicio de una tarea de movilidad o manipulación. El robot desarrolla una comprensión profunda del entorno a partir de la percepción, la interacción y la instrucción. El robot modifica su entorno para aumentar las posibilidades de lograr su tarea (eliminar obstrucciones, eliminar obstáculos, encender luces) y puede detectar y recuperarse de algunas fallas.

15 años: Los robots de servicio pueden realizar manipulaciones móviles a alta velocidad y sin colisiones en entornos dinámicos, no estructurados y completamente novedosos. Perciben su entorno, traducen sus percepciones en representaciones ambientales locales y globales/de corto y largo plazo apropiadas, posiblemente específicas de la tarea (mapas semánticos) y las utilizan para planificar continuamente el logro de los objetivos de la tarea global. Responden a los cambios dinámicos del entorno de una manera coherente con el objetivo global. Son capaces de intercalar un comportamiento exploratorio cuando es necesario con un comportamiento dirigido a la tarea. Interactúan con su entorno y son capaces de modificarlo de forma inteligente para garantizar y facilitar la realización de tareas. Esto incluye el razonamiento sobre las propiedades físicas de las interacciones entre los objetos y los entornos (deslizarse, empujar, lanzar, etc.) y el uso de herramientas y otros objetos.

### 3.2.3. Cognición

En la robótica de servicios existe la necesidad de operar en entornos no diseñados, adquirir nuevas habilidades a partir de demostraciones por parte de los usuarios e interactuar con los usuarios para realizar tareas e informar sobre su estado. Los sistemas cognitivos permiten la adquisición de nuevos modelos del entorno y la formación de nuevas habilidades que pueden utilizarse para acciones futuras. La cognición es esencial para una interacción fluida con los usuarios y la implementación en dominios donde hay oportunidades limitadas para la capacitación de los usuarios. Además, es esencial un grado adicional de inteligencia para hacer frente a un entorno no diseñado para garantizar la solidez del sistema.

En 5, 10 y 15 años, los siguientes objetivos son posibles con investigación y desarrollo sostenidos:

5 años: Demostración de un robot que puede aprender habilidades de una persona mediante la interacción con gestos y habla. Además, adquisición de modelos de ambiente interior no modelado.

10 años: Un robot que interactúa con los usuarios para adquirir secuencias de nuevas habilidades para realizar montajes o acciones complejas. El robot tiene facilidades para recuperarse de errores simples encontrados.

15 años: Un robot acompañante que puede ayudar en una variedad de tareas de servicio mediante la adaptación de habilidades para ayudar al usuario. La interacción se basa en el reconocimiento de la intención humana y la replanificación para ayudar al operador.

### 3.2.4. Percepción sólida

Los robots de servicio operan en entornos relativamente libres, por lo que existe la necesidad de proporcionar una funcionalidad perceptiva sólida para hacer frente a la variación ambiental. La percepción es fundamental para la navegación y la interacción con el entorno y para la interacción con usuarios y objetos en las proximidades del sistema. Hoy en día, la percepción se utiliza normalmente para reconocer e interactuar con objetos únicos y conocidos. Para permitir la escalabilidad, es necesario contar con instalaciones para la categorización de percepciones y la generalización entre escenas, eventos y actividades. Hoy en día ya existen métodos para mapear e interpretar escenas y actividades y el principal desafío es la escalabilidad y robustez para operar en entornos sin restricciones.

En 5, 10 y 15 años, los siguientes objetivos son posibles con investigación y desarrollo sostenidos:

5 años: Demostración de un sistema robótico que puede categorizar espacios y asociar automáticamente la semántica con lugares particulares. La detección se integrará con el tiempo para un funcionamiento robusto a gran escala, como un centro comercial o la estructura de un edificio. El robot podrá reconocer cientos de objetos.

10 años: Demostración de un sistema robótico que puede percibir eventos y actividades en el entorno para permitirle operar durante períodos prolongados de tiempo.

15 años: Demostración de un robot que integra múltiples modalidades sensoriales como GPS, visión e inercial para adquirir modelos del entorno y utilizar los modelos para navegación e interacción con objetos y eventos novedosos.

### 3.2.5. HRI e interfaces físicas e intuitivas

La implementación de robots de servicio tanto en entornos profesionales como domésticos requiere el uso de interfaces que hagan que los sistemas sean fácilmente accesibles para los usuarios. La difusión de la robótica a una comunidad más amplia requiere interfaces que puedan utilizarse con una formación mínima o nula. Las interfaces tienen dos aspectos: la interacción física con los usuarios y las personas cercanas y la interfaz de comando para asignar tareas y controlar el robot. La interacción física incluye el movimiento del cuerpo para mover/empujar objetos y personas y la interacción sin contacto, como el cambio de comportamiento de movimiento para comunicar la intención o el estado. El aspecto de la interfaz es

Esencial para tareas e informes de estado para que los operadores comprendan las acciones del robot.

En 5, 10 y 15 años, los siguientes objetivos son posibles con investigación y desarrollo sostenidos:

5 años: Demostración de un robot donde la instrucción de tareas se facilita mediante un diálogo multimodal para acciones/misiones simples y robots que pueden comunicar la intención de las acciones mediante el lenguaje corporal.

10 años: Demostración de un robot donde la programación mediante demostración se puede utilizar para el aprendizaje de tareas complejas, como la preparación de comidas en un hogar normal.

15 años: Demostración de un robot que un operador puede programar para una misión compleja en una escala de tiempo similar a la duración real de la tarea.

### 3.2.6. Adquisición de habilidades

Los robots de servicios deben poseer la capacidad de resolver tareas novedosas con un rendimiento en mejora continua. Esto requiere que los robots de servicios puedan adquirir nuevas habilidades de forma autónoma. Las habilidades se pueden adquirir de muchas maneras: se pueden obtener de bibliotecas de habilidades que contienen habilidades adquiridas por otros robots; las habilidades se pueden aprender desde cero o planteando otras habilidades mediante prueba y error; las habilidades también se pueden aprender mediante la observación de otros robots o humanos; Además, un instructor humano o robótico puede enseñarles a un robot. Pero la adquisición de habilidades también requiere que el robot identifique aquellas situaciones en las que una habilidad puede aplicarse con éxito. Las habilidades se pueden parametrizar; Aprender y seleccionar parámetros apropiados para una variedad de situaciones también se incluye en la capacidad de adquisición de habilidades. Se puede esperar que la capacidad de transferir habilidades de un dominio a otro o de transferir la experiencia adquirida con una habilidad a otra proporcione avances sustanciales en la adquisición de habilidades. Las capacidades adecuadas en el aprendizaje de habilidades serán posibles gracias a los avances en la percepción, la representación, el aprendizaje automático, la cognición, la planificación, el control, el reconocimiento de actividades y otras áreas relacionadas.

En 5, 10 y 15 años, los siguientes objetivos son posibles con investigación y desarrollo sostenidos:

5 años: Los robots pueden aprender una variedad de habilidades básicas mediante la observación, el ensayo y error y la demostración. Estas habilidades se pueden aplicar con éxito en condiciones que varían ligeramente de aquellas en las que se aprendió la habilidad. Los robots pueden realizar automáticamente adaptaciones menores de las habilidades adquiridas para adaptarlas y percibir diferencias con respecto al entorno original.

10 años: A medida que mejoran las capacidades de percepción, los robots pueden adquirir habilidades más complejas y diferenciar situaciones específicas en las que las habilidades son apropiadas. Se pueden combinar múltiples habilidades en habilidades más complejas de forma autónoma. El robot es capaz de identificar y razonar sobre el tipo de situación en la que las habilidades pueden aplicarse con éxito. El robot comprende con confianza los factores que afectan el éxito para dirigir el proceso de planificación de tal manera que se maximicen las posibilidades de éxito.

15 años: El robot adquiere continuamente nuevas habilidades y mejora la eficacia de las conocidas. Puede adquirir conocimientos independientes de las habilidades que permiten la transferencia de habilidades individuales a través de diferentes tareas y diferentes situaciones y la transferencia de habilidades a tareas novedosas. El robot es capaz de identificar patrones de generalización para la parametrización de habilidades individuales y entre habilidades.

### 3.2.7. Robots seguros

Hoy en día, la seguridad de los robots se logra mediante una clara separación de los espacios de trabajo para humanos y robots o mediante el funcionamiento a velocidades que no representen un riesgo para los humanos en las proximidades del sistema. A medida que el funcionamiento de humanos y robots se entrelaza cada vez más, será necesario

Considere explícitamente la operación a velocidades más altas mientras opera en proximidad directa de personas. Es necesario considerar normas de seguridad para permitir la certificación. Si bien tecnológicamente, la seguridad implica varios aspectos, incluida la necesidad de: capacidades de percepción avanzadas para detectar objetos y personas y predecir posibles peligros para la seguridad, sistemas de control que reaccionen ante posibles situaciones peligrosas y mecanismos de actuación inherentemente seguros para garantizar que el contacto con una persona u objetos cause poco o ningún daño.

En 5, 10 y 15 años, los siguientes objetivos son posibles con investigación y desarrollo sostenidos:

5 años: Se ha definido y aceptado a nivel mundial un estándar de seguridad para la robótica de servicios, cuyas especies permiten impactos y transferencias de energía. Los sistemas de manipulación básicos tienen implementadas las primeras versiones del estándar de seguridad.

10 años: se demuestra un robot inherentemente seguro para operar cerca de humanos en escenarios de aplicaciones industriales.

15 años: se demuestra un sistema robótico que realiza manipulación móvil en colaboración con humanos y se demuestra la seguridad tanto de los componentes de hardware como de software.

## 4. Investigación y Tecnologías Básicas

### 4.1. Arquitectura y representaciones

Durante los últimos 20 años han surgido varios modelos establecidos para la organización de sistemas.

Sin embargo, es característico que no se haya materializado ningún acuerdo o marco general para la organización del sistema. Para la navegación, la movilidad y la manipulación autónomas existen algunos métodos establecidos, como 4D/RCS y las arquitecturas deliberativas híbridas, pero una vez que se agregan componentes de interacción como la interacción humano-robot (HRI), hay poco acuerdo sobre un modelo común. Durante los últimos años el área de sistemas cognitivos ha intentado estudiar este problema, pero hasta el momento sin un modelo unificado. Para una adopción más amplia de sistemas robóticos, será esencial establecer marcos arquitectónicos que faciliten la integración de sistemas, el modelado de componentes y el diseño formal. Los marcos arquitectónicos apropiados pueden depender inicial o inherentemente de la tarea, el dominio de la aplicación, el robot o una variedad de otros factores. Sin embargo, se puede esperar una comprensión más profunda de los conceptos subyacentes a la cognición a partir de una unificación incremental de múltiples marcos en arquitecturas menos específicas para problemas o robots. Cualquiera de los marcos arquitectónicos antes mencionados estará estrechamente vinculado a un conjunto de representaciones apropiadas que capturen aspectos del entorno y los objetos contenidos en él, las capacidades del robot, la información del dominio, así como una descripción de la tarea del robot.

### 4.2. Control y planificación

A medida que los robots de servicio abordan problemas del mundo real en entornos dinámicos, no estructurados y abiertos, surgen nuevos desafíos en las áreas de algoritmos de control de robots y planificación de movimientos. Estos desafíos surgen de una mayor necesidad de autonomía y flexibilidad en el movimiento de los robots y la ejecución de tareas. Los algoritmos adecuados para el control y la planificación del movimiento deberán capturar estrategias de movimiento de alto nivel que se adapten a la retroalimentación de los sensores. Los desafíos de la investigación incluyen la consideración de las modalidades de detección y la incertidumbre.

en algoritmos de planificación y control; el desarrollo de representaciones y estrategias de movimiento capaces de incorporar señales de retroalimentación; movimiento sujeto a restricciones, que surgen de la cinemática, la dinámica y los sistemas no holonómicos; abordar las características de los entornos dinámicos; desarrollar algoritmos de control y planificación para sistemas híbridos; y comprender la complejidad de estos problemas algorítmicos en el control y la planificación del movimiento.

### 4.3. Percepción

En las últimas décadas se han logrado enormes avances en la percepción y el procesamiento sensorial, como se ve, por ejemplo, en búsquedas basadas en web como imágenes de Google y reconocimiento facial en aplicaciones de seguridad. El mapeo y la localización en entornos naturales también es posible para entornos diseñados.

Durante la última década, en particular, el uso de escáneres láser y GPS ha cambiado la forma en que se diseñan los sistemas de navegación y ha permitido una nueva generación de soluciones. Sin embargo, la localización y planificación en entornos sin GPS, que son bastante comunes, sigue siendo un área de investigación muy importante. Además, ha habido enormes avances en el reconocimiento de imágenes con la ampliación a grandes bases de datos. En el futuro, un gran número de robots dependerán de la retroalimentación sensorial para su funcionamiento y el dominio de la aplicación irá más allá de la configuración del modelo anterior. Por lo tanto, existe la necesidad de depender de múltiples sensores y de la fusión de información sensorial para proporcionar solidez. Se espera que el uso de información basada en imágenes en particular desempeñe un papel importante. La visión desempeñará un papel crucial en los nuevos métodos de mapeo, al facilitar la captación de objetos novedosos, en la categorización de objetos y lugares más allá del reconocimiento basado en instancias y en el diseño de interfaces de usuario flexibles.

### 4.4. Sensores robustos y de alta fidelidad

Los avances en microelectrónica y embalaje han dado lugar a una revolución en los sistemas sensoriales durante la última década. Los sensores de imagen han ido más allá de la calidad de transmisión para proporcionar imágenes de megapíxeles. La tecnología MEMS ha permitido una nueva generación de paquetes de sensores inerciales y RFID ha permitido un seguimiento más eficiente de paquetes y personas. Los sensores han permitido avances sólidos en ámbitos con buena calidad de señal. A medida que se amplíen los dominios de operación, surgirá la necesidad de nuevos tipos de sensores que permitan un funcionamiento robusto. Esto requiere nuevos métodos de control sólido y, lo que es más importante, sensores que proporcionen datos sólidos en presencia de variaciones dinámicas significativas y un dominio con mala resolución de datos. Los nuevos métodos de fabricación de silicio y MEMS abren oportunidades para una nueva generación de sensores que serán un aspecto clave del progreso futuro de la robótica.

### 4.5. Mecanismos novedosos y actuadores de alto rendimiento

Existe una intrincada interacción entre el progreso de los dispositivos mecánicos y su accionamiento y la complejidad algorítmica requerida para utilizarlos de acuerdo con su función. Algunos problemas algorítmicos pueden resolverse o facilitarse enormemente su solución mediante un diseño mecánico inteligente. Por lo tanto, los avances en el diseño de mecanismos y actuadores de alto rendimiento podrían permitir innovaciones revolucionarias en otras áreas de investigación básica, así como varias de las capacidades enumeradas en la hoja de ruta. Las áreas de investigación importantes incluyen el diseño y desarrollo de mecanismos con cumplimiento y cumplimiento variable, manos altamente diestras, manos inherentemente dóciles, actuadores energéticamente eficientes, seguros y de alto rendimiento, andadores dinámicos energéticamente eficientes y muchos más. De particular interés son los diseños mecánicos "inteligentes" que pueden subsumir, a través de su diseño, una función que de otro modo tendría que cumplirse mediante un control explícito. Los ejemplos incluyen mecanismos autoestabilizadores o manos con disposiciones especiales para lograr el cierre de forma sin control explícito.

## 4.6. Aprendizaje y adaptación

Muchas de las áreas de investigación básica descritas en esta sección pueden beneficiarse de los avances y la aplicación del aprendizaje y la adaptación. Los robots de servicios ocupan entornos complejos y viven en espacios de estados de alta dimensión. El conocimiento del entorno y del estado del robot es inherentemente incierto. Las acciones del robot suelen ser de naturaleza estocástica y su resultado se puede describir mejor mediante una distribución.

Muchos de los fenómenos que determinan el resultado de una acción son difíciles o incluso imposibles de modelar. Las técnicas de aprendizaje automático proporcionan una herramienta prometedora para abordar estas dificultades antes mencionadas. Estas técnicas pueden resultar útiles para aprender modelos de robots, tareas o entornos; aprender jerarquías profundas o niveles de representaciones desde representaciones sensoriales y motoras hasta abstracciones de tareas; aprendizaje de planes y políticas de control por imitación y aprendizaje por refuerzo; integrar el aprendizaje con las arquitecturas de control; métodos para inferencia probabilística a partir de información sensorial multimodal (p. ej., propioceptiva, táctil, visual); representaciones espacio-temporales estructuradas diseñadas para el aprendizaje de robots, como la incorporación de movimientos de baja dimensión.

## 4.7. Interacción física humano-robot

Gradualmente se eliminan las barreras de seguridad que han sido comunes en la robótica industrial y los robots se relacionarán en mayor medida con las personas para la ejecución cooperativa de tareas y la programación mediante demostración. Como parte de esto, los robots tendrán contacto físico directo con el usuario. Esto requiere, en primer lugar, una cuidadosa consideración de los aspectos de seguridad. Además, es necesario considerar cómo se pueden diseñar estos robots para proporcionar patrones de interacción que los usuarios perciban como naturales. Esto abarca todos los aspectos de la interacción, desde el movimiento físico del robot hasta la interacción física directa con una percepción de inercia mínima y control del fluido. Además, aquí es necesario considerar la interacción entre diseño y control para optimizar la funcionalidad.

## 4.8. Robots socialmente interactivos

A medida que los robots interactúan con las personas, existe la necesidad de poner fin a los sistemas con instalaciones para la interacción cooperativa con los humanos. Esta interacción es necesaria para asignar tareas a un sistema, para enseñar nuevas habilidades y tareas y para la ejecución cooperativa de tareas. Los modelos actuales para la interacción social incluyen gestos, habla/sonido, movimiento/pose corporal y postura física. Aquí existe la necesidad de integrar modelos de habilidades y tareas con la interpretación de la intención humana para permitir la interpretación de actividades nuevas y existentes. En la robótica de servicios existe una amplia necesidad de interacción social, desde encuentros con usuarios novatos hasta tareas cooperativas con un operador experto. Se requiere toda la gama de capacidades para proporcionar una adopción atractiva y a largo plazo de la robótica.

## 5. Colaboradores

Este informe documenta el resultado de una sesión de intercambio de ideas que tuvo lugar los días 7 y 8 de agosto de 2008 en San Francisco, CA. El informe forma parte del estudio del CCC sobre Robótica. El Computing Community Consortium (CCC) es un proyecto gestionado por la Computing Research Association (CRA) y patrocinado por la National Science Foundation (NSF). El presente informe ha sido escrito por los organizadores del taller y no elige la opción de CRA, CCC o NSF. La responsabilidad del informe recae enteramente en los autores.

El taller del CCC sobre robótica de servicios fue organizado por Oliver Brock, de la Universidad de Massachusetts, Bill Thomasmeyer, The Technology Collaborative, Inc y Henrik I Christensen, del Instituto de Tecnología de Georgia. Al taller asistieron las siguientes personas del mundo académico y de la industria:

Chad Jenkins Marrón	Josué Smith Intel	Trevor Blackwell  Cualquier robot
nicolas roy MIT	Eric Berger Garaje de sauce	Daniel Miller  Cualquier robot
Aarón Dólar MIT	Martín Buehler iRobot	Brian Carlisle Automatización precisa
Stefano Carpin UC Merced	Paolo Pirjanian Robótica Evolución	Parag Batavia Foster-Miller
Jana Kosecka jorge mason	Bill Townsend Tecnología Barrett	Andreas Hoffmann vecna
Andrés Ng stanford	Scott Thayer Zona roja	James Kuffner UMC
Andrea Tomás Tecnología de Georgia	Chris Urmson UMC/GM	Alex Foessel Deere
jing xiao UNC Charlotte	Cynthia Breazeal MIT	Oliver Brock  Universidad de Massachusetts Amherst
Carlos Rico IPM	Michael O'Connor novariante	Bill Thomasmeyer Colaboración tecnológica
Candace Sidner IPM	Pablo James Adepto	Henrik Christensen  Tecnología de Georgia
Stewart Tansley Investigación de Microsoft	Eric Whinnem  Boeing-fabricante de tecnología	Jake Huckaby  Tecnología de Georgia
	charlie kemp  Tecnología de Georgia	



## Capítulo 4

# Robótica: tecnologías y tendencias emergentes

## 1. Introducción

La robótica integra muchas disciplinas y tecnologías de componentes diferentes, como tecnología informática, sensores, materiales, actuadores, control e inteligencia artificial. Los avances en estas tecnologías de componentes a menudo han impulsado la robótica hacia adelante y, a cambio, la robótica a menudo ha proporcionado las aplicaciones para motivar los avances en las tecnologías de componentes.

El Taller sobre Tendencias y Tecnologías Emergentes examinó los avances tecnológicos continuos y probables en el futuro, para explorar su impacto en la robótica y mapear las implicaciones para las futuras direcciones de investigación en robótica y políticas de financiación. El taller identificó 63 avances tecnológicos diferentes que prometen impactar la robótica y 35 nuevas aplicaciones diferentes que serán posibles gracias a diversos avances. Se dieron proyecciones de desarrollos alcanzables en plazos de 5, 10 y 15 años. Este informe presenta las finales del taller, agrupadas en las siguientes categorías:

- sistemas de actuación
- sistemas de energía y potencia
- tecnología de fabricación y materiales
- micro-y nano-tecnología
- interfaces humano-robot
- comunicaciones y networking
- planificación y control
- robustez y fiabilidad
- aprendizaje automático
- percepción

El progreso en dichas tecnologías es esencial para las capacidades y aplicaciones previstas para la robótica y, por lo tanto, sirve como base para los talleres orientados a aplicaciones sobre fabricación y automatización, robótica médica y sanitaria, y robótica de servicios.

## 2. Hallazgos Estratégicos

### 2.1. Sistemas de actuación

Los avances en los sistemas de actuación son fundamentales para el progreso en muchas aplicaciones. Para muchas aplicaciones de robots móviles y de interacción humano-robot necesitamos robots rápidos, seguros, de bajo costo y confiables. Esto, a su vez, requiere nuevos actuadores y transmisiones que tengan una alta relación par-peso, potencia-peso, que interactúen de forma segura con las personas, que sean resistentes a los impactos, que tengan una impedancia adecuada para tareas interactivas y que tengan una velocidad y eficiencia razonables. Se pueden fabricar actuadores actuales para lograr un buen rendimiento en algunas de estas métricas, pero no un buen rendimiento general. Este déficit ha dado lugar a robots pesados, lentos y frágiles con los que resulta peligroso trabajar con ellos. Así como la tecnología de los motores a reacción es una ventaja estratégica fundamental para las aeronaves de alto rendimiento, la tecnología de accionamiento proporcionará una ventaja competitiva en la robótica.

Las mejoras en la tecnología de actuadores en los próximos años no serán espectaculares, pero los avances constantes y la particularización de la robótica ampliarán las capacidades de los robots. Se espera que los siguientes segmentos del mercado mundial de robots crezcan rápidamente si se desarrollan las tecnologías de actuadores necesarias.

La asistencia física de los humanos por parte de robots, como cargar a una persona escaleras arriba, requiere un peso ligero. actuación con la impedancia adecuada.

- Los micronodos de sensores móviles para seguridad requieren actuadores en miniatura de alto rendimiento, como para ultraligero.
- Los trajes eléctricos y las prótesis requieren actuadores de alta potencia, alto torque y alta eficiencia.
- Los robots domésticos requieren actuadores seguros, de bajo coste y de baja inercia para su movilidad y manipulación.

### 2.2. Energía y sistemas de potencia

Dos cuestiones clave, el almacenamiento de energía y la entrega de energía, son vitales para muchos dominios de la robótica, en particular los robots móviles y autónomos. Determinan la carga útil, la duración de la misión y el intervalo de servicio. También son vitales para el transporte y la electrónica de consumo, que son mercados mucho más grandes que la robótica y que poseen intensos programas de investigación. De hecho, la mayor parte del progreso provendrá de estas áreas.

El almacenamiento de energía implica limitaciones derivadas de la química fundamental, así como numerosos problemas económicos y relacionados con la seguridad. En aquellas aplicaciones en las que sea práctico, los hidrocarburos líquidos tendrán una ventaja en densidad energética durante al menos los próximos veinte años. En otras aplicaciones, las baterías dominan y es probable que mejoren dos o tres veces en el mismo período, pero seguirán teniendo una densidad energética diez veces menor que la gasolina.

Otras tecnologías de almacenamiento de energía presentan problemas importantes para su uso práctico en muchas aplicaciones. El hidrógeno requiere un importante almacenamiento aéreo. Los monopropulsores (p. ej., peróxido de hidrógeno) tienen potencial, pero plantean importantes problemas de seguridad y manipulación. El peróxido de hidrógeno se autodenona en altas concentraciones (alrededor del 80%), pero se requieren altas concentraciones para obtener suficiente energía.

La entrega de energía está dominada más por el diseño que por la química. Es relativamente poco importante en baterías para misiones de larga duración. Se están preparando baterías mejoradas para el mercado. Hay varias empresas en el proceso a corto plazo de comercializar nuevos materiales para electrodos de baterías de litio que pueden proporcionar aumentos en la densidad de potencia y/o el ciclo de vida. Sin embargo, es poco probable que las baterías mejoradas de esta categoría superen la densidad energética de las actuales baterías de polímero de litio con cobalto.

electrodos de oxido. Hay un grupo de empresas que trabajan en baterías que pueden ofrecer una mejora de 2 a 3 veces en la densidad de energía, principalmente en el área de baterías de metal-aire, como las baterías recargables de zinc-aire.

La entrega de energía es vital en los sistemas basados en combustible. Los motores ya están muy optimizados, con claras compensaciones en términos de eficiencia. Las pilas de combustible deberían experimentar una mejora importante en la densidad de potencia, pero no está claro si superan a los motores.

Ante perspectivas tan modestas para el poder y la energía, la principal opción es explorar tecnologías relacionadas con fuertes aplicaciones a la robótica.

- Cosecha. Los requisitos para el almacenamiento de energía pueden reducirse si se puede adquirir energía en el campo.
- Eficiencia. Los requisitos para el almacenamiento de energía se pueden relajar si se consume menos energía para realizar la tarea.
- Miniaturización. La mayoría de los sistemas robóticos operan en escalas mucho más pequeñas que los vehículos de transporte. Algunos son mucho más pequeños que los productos electrónicos de consumo (microvehículos aéreos, polvo inteligente, etc.). Los nuevos sistemas de potencia y energía deben ampliarse a tamaños relevantes para los robots. La robótica también puede aprovechar los avances de los aficionados. Los motores y baterías en miniatura son desafíos bien establecidos en los aviones controlados a distancia.

## 2.3. Tecnología de fabricación y materiales

Los avances en la tecnología de fabricación y materiales también son fundamentales para la producción de las próximas generaciones de robots, al permitir estructuras novedosas livianas, seguras, de bajo costo, conformes y duraderas. Las tecnologías de fabricación integradas darán como resultado subsistemas compactos y livianos, resistentes y de alto rendimiento. Las tecnologías de miniaturización a escala meso/micro/nano conducirán a la proliferación de componentes de bajo costo que se integran fácilmente. Las tecnologías de materiales inteligentes conducirán a sensores portátiles compatibles que pueden formar la piel de un robot o colocarse en humanos para realizar mediciones.

Las nuevas tecnologías de materiales producirán estructuras robóticas ligeras, suaves y seguras. Las aplicaciones que estarían habilitadas son:

- Robots portátiles, por ejemplo, prótesis, asistencia de fuerza para los enfermos y rehabilitación.
- Robots de servicio/domésticos para personas mayores y otros tipos de asistencia
- Robots en miniatura para seguridad y protección, por ejemplo, enjambres de búsqueda y rescate

## 2.4. Micro y Nanotecnología

La micro y nano robótica proporcionará capacidades sin precedentes para observar e interactuar con el micromundo, desde moléculas hasta células y órganos. Al diseñar sistemas robóticos con dimensiones características en el rango de nanómetros a milímetros, estos robots podrán interactuar con el entorno de formas y utilizando propiedades físicas que no son posibles con los sistemas convencionales de macroescala.

Hay dos aspectos de la micro y nanotecnología: (1) manipulación micro y nano por parte de robots grandes y (2) robots que son en sí mismos muy pequeños. La micro y nanomanipulación por parte de grandes robots mejorará nuestra comprensión de los materiales y las estructuras biológicas, además de ayudar en la microfabricación.

La construcción de robots muy pequeños producirá dispositivos autónomos de mesoescala para luz, deambulación y natación. Las bacterias artificiales y los sistemas celulares también son ejemplos de microrobots. Los microrobots o nanorobots de pequeño tamaño pueden actuar en enjambres para producir capacidades mejoradas.

- El medio ambiente humano en general puede observarse mejor mediante el uso de enjambres en tales aplicaciones como vigilancia ambiental y búsqueda y salvamento.
- Enjambres de microrobots pueden realizar in vivo terapias médicas como la micromanipulación o entrega de medicamentos.
- Las bacterias artificiales pueden diseñarse con capacidades de detección, manipulación y locomoción.
- Los sistemas celulares pueden actuar como fábricas en miniatura y como sensores integrados para la detección de enfermedades.

## 2.5. Interfaces hombre-robot

La interacción entre humanos y robots es fundamental para muchas de las aplicaciones más interesantes de la robótica, incluida la robótica médica, la robótica de asistencia, las prótesis, la rehabilitación, el transporte, el aumento humano, el entretenimiento y la educación. Las interfaces hombre-robot incluyen: interacción de voz; interacción visual, incluidos gestos e inferencia de intención a partir del seguimiento visual; interfaces neuronales que incluyen sondas físicas, EEG (ondas cerebrales) y EMG de superficie; interacción física, incluidos exoesqueletos y dispositivos hápticos; manipulación física del cuerpo humano para su transporte o rehabilitación; prótesis inteligentes; y dispositivos invasivos como algunos biomonitores, instrumentos quirúrgicos e interfaces neuronales.

Una revisión de esta lista muestra que las interfaces hombre-robot son fundamentales para las aplicaciones que nos afectarán más profundamente.

Los avances en la interacción entre humanos y robots se están produciendo rápidamente y ya han tenido un impacto. La Nintendo Wii ilustra que un avance relativamente pequeño en el reconocimiento de gestos puede tener un impacto significativo en la experiencia humana. Los sistemas robóticos ya están utilizando el reconocimiento de comportamiento para automatizar la ciencia de laboratorio con pruebas en animales. Asimismo, la cirugía teleoperada ha demostrado ser factible y comercialmente exitosa. Las interfaces neuronales han logrado avances sorprendentes en los últimos años, llegando incluso a convertirse en un primer sistema comercial. Otras aplicaciones en el horizonte incluyen:

- Robots de fábrica y robots de logística militar que aprenden tareas de montaje y almacenamiento mediante observar y ayudar a humanos sin programación;
- Robots de servicio doméstico que aprenden tareas específicas no repetitivas mediante la observación de humanos, infiriendo cómo ayudar y modificar su asistencia a través del habla y el gesto del ser humano;
- un equipo de robots de búsqueda y rescate, que trabajan con humanos, que pueden desplegarse y negociar de forma autónoma para transmitir información desde varios sitios a usuarios humanos de modo que la cantidad de operadores humanos sea menor que la cantidad de robots;
- Exoesqueletos "hombre-amplificadores" para uso militar y comercial que se deslizan sobre partes del cuerpo o todo el cuerpo y mejorar o reemplazar intuitivamente la velocidad/fuerza/destreza humana respondiendo a impulsos nerviosos u otras formas de "pensamiento" humano.

Las tecnologías relacionadas incluyen interacción del habla, reconocimiento de gestos y comportamientos, materiales biocompatibles, neurociencia y bioingeniería.

## 2.6. Comunicaciones y Networking

Las comunicaciones y las redes son tecnologías habilitadoras fundamentales para numerosas aplicaciones de alta prioridad. Las comunicaciones y las redes son necesarias siempre que los sistemas robóticos se distribuyan espacialmente, siempre que se deba acceder a datos remotos o recursos informáticos, o siempre que los humanos

Se requiere interacción. Los avances en las comunicaciones y las redes conducirán a sistemas más capaces, más robustos y más fáciles de implementar. Las aplicaciones habilitadas por los avances en las comunicaciones y las redes incluyen:

- redes de sensores móviles distribuidas, para monitoreo ambiental, monitoreo de la civil infraestructura, seguimiento de los patios de transporte de contenedores, etc.;
- vehículos de pasajeros autónomos, que necesitan comunicarse entre sí y con el tráfico sistemas de control, y con datos externos y recursos informáticos como asistencia a la navegación;
- sistemas robóticos domésticos, tales como sistemas de seguridad para el hogar, cuidados de salud en el hogar y sistemas de asistencia robótica y domótica;
- Microsistemas o nanosistemas distribuidos implementados para instrumentación biológica, como los intracelulares. estudios científicos.

## 2.7. Planificación y Control

La planificación y el control son las ciencias de decisión empleadas para determinar qué acciones realizará un robot. Incluyen algunos de los desafíos más profundos de la robótica. Incluso con sensores y hardware perfectos, está claro que la planificación y el control robóticos están muy por debajo del desempeño humano en la mayoría de las tareas. Con el nivel actual de algoritmos de planificación y control, los robots a menudo tienen que ser empleados en escenarios estrictamente prescritos, siguiendo una programación muy detallada escrita laboriosamente por humanos.

En otros casos, la autonomía es imposible y un ser humano debe integrarse como parte de un sistema telerobótico. Las aplicaciones habilitadas por los avances en planificación y control incluirán:

- los robots de fábrica se adaptan a una nueva tarea sin una nueva programación;
- Las tareas actualmente teleoperadas, como la cirugía y la desactivación de bombas, pasarán a autonomía supervisada;
- La automatización logística permitirá que los robots muevan de forma autónoma mercancías desde los productores hasta red de distribución a los consumidores;
- El control autónomo de vehículos de alta velocidad en entornos dinámicos permitirá a los pasajeros pilotos automáticos de vehículos;

Habrán robots autónomos capaces de trabajar en entornos novedosos sin reprogramación. hacer que la robótica doméstica sea asequible.

## 2.8. Robustez y fiabilidad

La robustez y la confiabilidad garantizan que un robot continuará haciendo su trabajo, incluso cuando el entorno operativo se aleja del ideal. Las fallas son costosas e inconvenientes y, en algunas aplicaciones, son inaceptables. La mayor robustez y confiabilidad permitirán muchas aplicaciones:

Cuando el fallo es inaceptable: cirugía robótica, pilotos automáticos de vehículos de pasajeros, seguridad crítica y aplicaciones de seguridad.

- Cuando el fracaso es costoso e inconveniente: todo lo demás.

## 2.9. Percepción y aprendizaje automático

La percepción y el aprendizaje automático son las técnicas para utilizar la información sensorial, ya sea para reconocer el estado del mundo que rodea al robot (percepción) o para mejorar su capacidad para realizar un trabajo (aprendizaje automático). Es en gran medida la percepción y el aprendizaje automático lo que distingue a un robot de una máquina ordinaria. Con la percepción y el aprendizaje automático, un robot puede ajustar sus acciones a la situación actual y mejorar con la experiencia, ambas características del comportamiento inteligente. Los avances en percepción y aprendizaje automático permiten nuevas aplicaciones:

- Los robots de fábrica pueden realizar un nuevo trabajo sin reprogramarlos y, posiblemente, observando un humano u otro robot haciendo el trabajo;
- La instalación de robots en todas las aplicaciones se puede realizar sin fines especiales y costosos programación, observando humanos o siendo construido por un humano.
- Tareas dinámicas muy desafiantes, como caminar, también se benefician de las técnicas de aprendizaje automático.

## 3. Desafíos/capacidades clave

### 3.1. Escenarios motivadores/ejemplares

#### 3.1.1. Seguridad - Nacional, Industrial, Hogar

La seguridad es un amplio conjunto de aplicaciones. En seguridad nacional incluimos operaciones militares como combate, reconocimiento, vigilancia y apoyo logístico, y seguridad nacional como seguridad fronteriza, seguridad aeroportuaria y otras instalaciones de infraestructura crítica. La tecnología robótica ya ha tenido un impacto sustancial en la seguridad nacional, mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados en operaciones militares y robots teleoperados de desactivación de bombas. Los vehículos terrestres autónomos y semiautónomos apenas están comenzando a desplegarse. También se está implementando tecnología de videovigilancia.

Es más probable que la seguridad industrial y doméstica se centre en la vigilancia. La implementación generalizada en los hogares dependerá de sistemas altamente asequibles y de fácil instalación.

Varias tecnologías emergentes influyen directamente en las aplicaciones de seguridad. Una mayor movilidad y una mejor percepción, inteligencia y comunicaciones darían como resultado robots militares más capaces, especialmente en reconocimiento y vigilancia. Las redes de sensores, ya sean móviles o fijas, con una percepción y comunicaciones mejoradas, monitorearían más eficazmente las zonas de seguridad, incluidas fronteras, aeropuertos, terminales marítimas, zonas de seguridad industrial e instalaciones de infraestructura civil. Todas las aplicaciones de seguridad se benefician de los avances en redes de sensores, software de percepción y redes de comunicaciones, especialmente la seguridad del hogar.

#### 3.1.2. Fabricación y distribución

La robótica y la automatización están bien establecidas en la manufactura, sobre todo en el ensamblaje de automóviles y la electrónica de consumo. Las tecnologías robóticas también se están implementando en la cadena de distribución, desde patios de envío y almacenes totalmente automatizados hasta sistemas de monitoreo de inventario y puntos de venta en

puntos de venta. La llegada de tecnologías más capaces y maduras podría tener un amplio impacto tanto en la fabricación como en la distribución. Las tecnologías mejoradas de energía, actuación y materiales conducirán a sistemas más capaces y seguros. Las mejoras en las comunicaciones, la percepción y la interacción entre humanos y robots conducirán a sistemas más fáciles de implementar, más asequibles y más adaptables.

La combinación de todas estas tecnologías con nuevas técnicas, protocolos y estándares de programación cambiará la economía subyacente, de modo que la tecnología pueda adoptarse de manera más amplia. Al principio de este escenario veríamos una mayor adopción por parte de las grandes empresas manufactureras, pero más adelante veríamos la adopción por parte de empresas más pequeñas, incluidas en última instancia tiendas muy pequeñas.

### 3.1.3. Transporte

El principal foco de transporte son los vehículos de pasajeros en calles y carreteras. Los beneficios de la automatización de vehículos de pasajeros son enormes en términos de costo, tiempo, comodidad y, sobre todo, seguridad. Los primeros en adoptarlo pueden incluir sistemas privados cerrados, como empresas mineras o madereras. Algunas de las tecnologías ya están bastante maduras y se utilizan, por ejemplo, en astilleros de envío automatizados. La tecnología para la conducción urbana en un entorno cerrado se demostró en el reciente DARPA Urban Challenge, haciendo un uso intensivo de alcance láser, radar y GPS. Quedan muchos desafíos por delante para producir un sistema confiable y robusto que pueda hacer frente de manera segura a todas las incertidumbres de la conducción normal. Sin embargo, la tecnología se trasladará gradualmente a nuestros vehículos. La advertencia de colisión, la corrección de derrape, la asistencia a la navegación y el control de cruce adaptativo son ejemplos de tecnología que ya se está implementando.

El transporte es tan amplio que todas las tecnologías relacionadas con la robótica son relevantes. Los más obvios son la percepción, la movilidad y la navegación, pero son necesarios avances en la interacción, las redes y las comunicaciones, la actuación, la potencia, el control y el aprendizaje automático de los robots humanos.

### 3.1.4. Atención médica y sanitaria

Las aplicaciones médicas y de atención sanitaria incluyen cirugía, terapia de rehabilitación, prótesis y ortesis, imágenes médicas, monitorización y asistencia terapéutica. La tecnología robótica tendrá un impacto en la atención médica y sanitaria de muchas maneras, proporcionando nuevas herramientas y técnicas para los profesionales, además de permitir a las personas controlar y afrontar su propia salud de forma más eficaz. La tecnología robótica se ha empleado tanto en imágenes médicas como en cirugía asistida por computadora desde hace muchos años, y la tecnología continúa avanzando rápidamente. Se están desarrollando y demostrando nuevas herramientas y técnicas que permitirán procedimientos que antes eran imposibles o costosos y peligrosos.

Las prótesis neuronales se están demostrando en estudios de casos y las prótesis de extremidades avanzan rápidamente. También se están demostrando técnicas para el seguimiento robótico de la terapia en el hogar. En última instancia, la tecnología de atención médica puede integrarse en nuestros hogares y monitorear nuestra salud, nutrición y anomalías de comportamiento. Si bien casi todas las tecnologías robóticas son relevantes para la atención de la salud, las áreas especialmente relevantes incluyen la micro y nanotecnología, la energía, la actuación y las interfaces físicas entre humanos y robots.

### 3.1.5. Robótica Doméstica

La robótica doméstica significa el uso de la tecnología robótica en el hogar, aunque algunas de las aplicaciones más importantes, seguridad y atención sanitaria, están cubiertas por otras aplicaciones. Las aplicaciones restantes más importantes serían la educación, el entretenimiento, la limpieza y las comunicaciones. Ya se han producido éxitos notables en el entretenimiento y la limpieza, con unos pocos millones de robots aspiradores en servicio.

La asequibilidad, la facilidad de instalación y la facilidad de uso son factores clave en el impacto doméstico. Las tecnologías clave son actuadores, energía, interacción humana, comunicaciones y redes, percepción, seguridad, robustez y confiabilidad.

### 3.1.6. Ciencia y Tecnología

En algunos casos, las tecnologías robóticas permiten técnicas nuevas o mejoradas en otros campos de la ciencia y la tecnología. Hay muchos ejemplos: la micro y la nanotecnología pueden permitir una instrumentación superior de los sistemas biológicos, incluso hasta el nivel celular. Los procedimientos de automatización de laboratorio permiten la experimentación a gran escala. Los algoritmos de reconocimiento de comportamiento respaldan estudios en animales que antes eran imposibles o costosos. Una mejor percepción tiene el potencial de tener un amplio impacto en prácticamente todas las partes del estudio científico. Ya se han demostrado varios casos que involucran estudios con ratones de laboratorio para el descubrimiento de fármacos, estudios de comportamiento de insectos e incluso estudios astronómicos.

Otra tendencia interesante surge de una conexión fundamental entre biología y robótica. Ambos campos abordan los problemas que enfrenta un agente que sobrevive y logra algunos objetivos de comportamiento en el mundo real. En robótica, la aplicación de observaciones biológicas al diseño de robots se denomina biomimética. También hay algunas ideas y técnicas básicas, desde la robótica hasta la biología.

## 3.2. Hoja de ruta de capacidades

### 3.2.1. Sistemas de actuación

Se esboza el impacto de los desarrollos en los sistemas de actuación para dos sistemas robóticos. Los ornitópteros son robots con alas, por ejemplo parecidos a pájaros (50 cm) o insectos (5 cm). Las capacidades previstas son autoridad total de control de balanceo, cabeceo, guiñada, empuje y elevación, y una duración de misión de 30 minutos.

5 años: ornitóptero de 50 cm - capacidad de carga igual a la masa del sistema actuador. Ornitóptero de 5 cm: capacidad de carga igual a 1/10 de la masa del sistema actuador

10 años: ornitóptero de 50 cm - capacidad de carga igual a 10 veces la masa del sistema actuador. Ornitóptero de 5 cm: capacidad de carga igual a la masa del sistema actuador

15 años: ornitóptero de 50 cm, capacidad de carga igual a la masa del sistema actuador, duración de la misión de 30 días. Ornitóptero de 5 cm: capacidad de carga igual a 10 veces la masa del sistema actuador.

Se prevén exoesqueletos motorizados para asistencia en movimiento con una duración de misión de 8 horas (turno de trabajo). Un avance clave son los actuadores con impedancia pasiva y/o variable.

5 años: Capacidad de carga igual a la masa del exoesqueleto.

10 años: Capacidad de carga igual a 10 veces la masa del exoesqueleto.

15 años: Capacidad de carga igual a 10X la masa del exoesqueleto, carga transportada en brazos.

### 3.2.2. Energía y sistemas de potencia

Cosecha. Hay dos cuestiones en la recolección: mecanismos para la localización y adquisición de energía; y algoritmos para la gestión de energía y comportamientos de búsqueda de energía. La recolección debe estar bien adaptada al consumo: no tiene sentido recolectar milivatios de energía de vibración en un robot que consume varios vatios.

Eficiencia. La eficiencia es principalmente un problema de mecanismo: actuadores y válvulas mejorados, recuperación de energía (elástica y/o regenerativa) y algoritmos para la gestión de energía. Las mejoras aquí también tienen aplicación a la automatización industrial, un mercado más grande.

Miniaturización. La miniaturización suele ser simplemente una cuestión de reenvasado, pero a veces dominan las leyes de escala.

### 3.2.3. Nano y Microtecnología

#### 5 años—

- Dispositivos sub-mm sin ataduras capaces de realizar entregas y sensores dirigidos in vivo demostrados en modelos animales.

Nanomanipulación robótica de objetos no esféricos sub-100 nm con control preciso de 5DOF en el fluido, incluida la fuerza, sirvió para la nanomanipulación de moléculas de alto peso molecular.

- Ensayos de células de alto rendimiento con aplicaciones industriales relevantes.

Sistemas de células instrumentadas por cable, es decir, redes de nanosensores que adquieren y procesan en datos en tiempo real en múltiples modalidades y múltiples escalas temporales y espaciales, para investigaciones biológicas (“comprensión de la biología”)

- Dispositivos sub-cm sin ataduras capaces de volar, deambular o nadar en ambientes al aire libre.

#### 10 años—

Cada vez más complejas en terapias de detección y manipulación vivo mediante microrobots sub-mm.

- Seguimiento y control preciso de objetos no esféricos inferiores a 100 nm en vivo.

- Nanorobots intracelulares para la investigación biológica.

Bacterias artificiales: detección y locomoción.

- Ensayos moleculares basados en nanomanipulación robótica, incluida la investigación de las relaciones fuerza-estructura-función en proteínas mediante manipulación.

Sistemas celulares instrumentados, pero inalámbricos e integrados en tejido (posiblemente explantes), para aplicaciones también en la detección de enfermedades.

- Robots artificiales similares a bacterias alimentados desde campos externos.

- Dispositivos sub-cm sin ataduras capaces de movilidad todo terreno y trabajando en enjambres coordinados para tareas como búsqueda y rescate en desastres.

#### 15 años—

- Microrobots autoensamblables in vivo.

- Plataforma de microrobot estandarizada para administrar una variedad de terapias médicas in vivo.

Bacterias artificiales: detección, manipulación y locomoción.

- Plataforma experimental para el desarrollo de fármacos basada en la nanomanipulación de moléculas.

- Sistemas de células instrumentadas, pero con capacidades de actuador (por ejemplo, para moverse, para liberar fármacos o interactuar mecánicamente con las células) e in vivo.

- Bacterias artificiales autónomas .

Enjambres de dispositivos sub-cm no conectados capaces de monitorear y monitorear áreas grandes

Control como polinización de cultivos, seguimiento de la salud y protección de plagas.

### 3.2.4. Interfaces hombre-robot

#### 5 años

- Control sólido de exoesqueletos mediante electromiografía de superficie integrada en enlaces.  
Comandos confiables por gestos/voz de robots de servicio basados en taxonomías limitadas con pocas o ninguna iteraciones de entrenamiento.
- Control compartido de procedimientos quirúrgicos utilizando retroalimentación sensorial e imágenes en tiempo real.
- Dispositivo háptico tipo PHANTOM, disponible comercialmente y de bajo coste (similar a un videojuego).
- Estándares y prácticas adaptables para interfaces de telepresencia intuitivas para control uno a uno.

#### 10 años

- Control neurológico de exoesqueletos mediante neuroprótesis y EMG de superficie avanzada.  
Inferencia de intenciones complejas a partir de la interacción natural de gestos/vozes con humanos.  
Control remoto de procedimientos quirúrgicos a través de redes limitadas utilizando retroalimentación sensorial en tiempo real e imágenes con corrección predictiva y estimulación de los procedimientos.
- Estándares y prácticas adaptables para interfaces de telepresencia intuitivas para 1:N(humano:robot)  
Control de robots remotos.  
Estándares y prácticas adaptables para la interacción segura de humanos con robots basados en tareas y retroalimentación sensorial.

#### 15 años

- Control neurológico de exoesqueletos mediante ondas cerebrales (EEG).
- Control neurológico invasivo que sea ampliamente aceptable para los usuarios potenciales.
- Interfaces de cooperación perfectas mediante gestos, voz y comunicación a través de la tarea.  
Estándares y prácticas adaptables para interfaces intuitivas y de autoarbitraje para muchos seres humanos controlando muchos robots remotos.

### 3.2.5. Comunicaciones

#### 5 años

- Protocolos para redes ad-hoc, de múltiples saltos, dispersas y altamente volátiles con ancho de banda alto y bajo latencia.
- Mejoras en la localización en redes UWB y mejor utilización del espectro. Integración de Redes de área amplia, de área local y de área personal para una cobertura local a global más fluida (heterogeneidad).
- Clústeres de comunicación cooperativa en redes ad-hoc para una mejor conectividad y energía utilización, etcétera.
- Integración de las redes de telefonía celular y satelital para aumentar otras redes.

#### ~~10 años~~

- Radiocognitiva: extensión de la teoría y desarrollo de sistemas implementables.

Mejoras en los métodos y protocolos (middleware) de metanivel para agentes heterogéneos para asignación de tareas, intercambio de recursos, etc.

Métodos y teorías generales que abarcan la comunicación no tradicional (formas biológicas a diferencia de RF).

- Comunicación a través de la tarea.
- Estrategias de colaboración local que abordan mejor la conectividad de red deficiente en entornos volátiles. entornos (todos los entornos).

#### ~~15 años~~

- Uso ampliado de estándares multimedia comerciales (capa de objetos de vídeo, codificación de contenido, etc.).
- Incorporación de estándares de radio cognitivos con estrategias de colaboración/cooperación multiagente.
- Enfoques robustos de middleware para la asignación de tareas genéricas, la distribución de recursos y datos compartir a través de múltiples modalidades de red con interrupciones frecuentes.

## 4. Investigación/Tecnologías

### 4.1. Sistemas de actuación

Las siguientes son proyecciones para el desarrollo de la actuación en marcos temporales de 5, 10 y 15 años.

~~5 años:~~ mayor par y potencia respecto al peso que el músculo ( $> 20 \text{ Nm/kg}$  y  $> 50 \text{ W/kg}$ ) con impedancia adecuada en una escala de tamaño de 1 gramo a 1 kg.

~~10 años:~~ mejora 5 veces mayor en torque y potencia en relación con el peso con impedancia adecuada, en escala de tamaño de miligramos a kg, ancho de banda suficiente, eficiencia de la planta de energía  $> 40 \%$ , potencia de retención mínima, control de baja complejidad.

~~15 años:~~ actuadores de alto rendimiento para manipulación móvil liviana y segura jerárquicos para compensación de precisión/potencia y tolerancia a fallas fuentes de energía alternativas (¿alimentos en lugar de baterías?)

### 4.2. Energía y sistemas de potencia

Las siguientes son proyecciones de la evolución de la energía y la potencia en los plazos de 5, 10 y 15 años.

#### ~~5 años~~

- Cosecha. Desarrollan un robot móvil de 10 kg capaz de recargarse de forma totalmente autónoma en una oficina ambiente.
- Eficiencia. Construya un sistema de locomoción con patas robusto que consuma el doble de energía en comparación con un sistema biológico similar.

- Miniaturización. Fabricar una batería de 100 mg que supere los 500 kJ/kg y la capacidad de suministro de energía y almacenamiento de energía de 1 kW/kg.

#### 10 años

- Cosecha. Desarrollar un robot móvil de 10 kg capaz de realizar recargas y gestión de energía de forma totalmente autónoma en exteriores (> 25 % de ciclo de trabajo). Desarrollar un UAV de 1 gramo capaz de operar en un ciclo de trabajo del 5% mientras se cosecha en un ambiente interior/de oficina.
- Eficiencia. Mejorar el sistema de locomoción de las piernas para igualar la potencia al modelo biológico.
- Miniaturización. Producir una fuente de energía basada en combustible con una masa de convertidor < 50 mg, potencia > 100 W/kg y eficiencia > 10%.

#### 15 años

- Cosecha. Desarrollar un UAV de 1 gramo capaz de operar con un ciclo de trabajo del 25% mientras se cosecha al aire libre.
- Eficiencia. Mejorar el sistema de locomoción de las piernas al 50% de la potencia del modelo biológico.
- Miniaturización. Produzca una fuente de energía basada en combustible con una masa de convertidor < 50 mg, una potencia > 1 kW/kg y una eficiencia > 10 %.

## 4.3. Tecnología de fabricación y materiales

Las hojas de ruta están organizadas en cuatro áreas y abordan varias cuestiones clave: costo; aporte; integración heterogénea; complejidad (2d o 3d); cumplimiento; fuerza-peso; hora de comprar; biodegradable/reciclable/verde; y modularidad.

### 4.3.1. Hoja de ruta de fabricación integrada

Las tecnologías habilitadas incluyen robots de consumo de bajo costo, alto rendimiento (alta potencia y bajo peso), alta confiabilidad y protección de las propiedades intelectuales estadounidenses.

5 años: detección integrada, mecánica, actuación, cableado, embalaje (encapsulación de componentes clave)

10 años: un proceso de fabricación programable unificado (por ejemplo, impresión, deposición, etc.) de componentes heterogéneos sin montaje manual

15 años: Y10 + alto rendimiento

### 4.3.2. Hoja de ruta de miniaturización

Las tecnologías habilitadas incluyen seguridad, atención médica y redes de sensores móviles para búsqueda y rescate.

5 años: detección integrada miniaturizada, mecánica, actuación, cableado, comunicaciones, embalaje (encapsulación de componentes clave); Componentes y sistemas combinados meso/micro/nano.

10 años: alta penetración

15 años: Y10 + bajo coste + uso de materiales inteligentes basados en micro y nanotecnología

#### 4.3.3. Hoja de ruta de materiales inteligentes

Las tecnologías habilitadas incluyen trajes de poder y prótesis.

5 años: piel del sensor portátil compatible

10 años: sensor portátil compatible y diseño de actuador personalizado según el esqueleto del usuario individual estructura

15 años: sensor portátil compatible y revestimiento del actuador con potencia/energía integrada; Actuadores de materiales inteligentes modulares y producibles en masa cofabricados con la estructura de la piel.

#### 4.3.4. Hoja de ruta de materiales

Las tecnologías habilitadas incluyen robots de mayor rendimiento, más seguros y más ágiles.

5 años: estructuras robóticas ligeras, blandas y seguras (por ejemplo, humanoides con una masa de 20 kg para tareas domésticas ligeras); Nuevos materiales con propiedades de adhesión/fricción controlables para una movilidad ágil y de alta eficiencia y manipulación de piezas frágiles.

10 años: sensores y actuadores integrados en materiales blandos para miembros y cuerpos robóticos; suavidad controlable; Robots tumbados a escala centimétrica basados en alas lapeadas altamente maniobrables.

15 años: producción en masa de bajo coste y fabricación personalizable de robots blandos, desde la mesoescala hasta la nanoescala, con materiales reciclables.

## 4.4. Planificación y Control

5 años

Una nueva generación de algoritmos de filtrado que aprovechan las limitaciones de las tareas para minimizar la detección. cálculo y estimación.

- Bibliotecas sólidas y disponibles públicamente para calcular planes de retroalimentación óptimos en varios (3 a 6) dimensiones.
- Enfoques de replanificación rápida basados en cálculos previos y memoria de bajo costo, que proporcionan una alternativa a los planes de retroalimentación almacenados explícitamente.
- Desarrollo de criterios matemáticos para predecir la calidad del movimiento de las primitivas o Comportamientos en algoritmos de planificación.

10 años

Algoritmos de planificación y control centrados en sensores que operan directamente en la información reducida Espacios resultantes de filtros minimalistas.

Desarrollo de técnicas basadas en muestreo que calculen planes de retroalimentación o control viables leyes en espacios de alta dimensión.

Unificó las nociones de replanificación y control de retroalimentación en tiempo real, incluidas las matemáticas. Análisis de propiedades de convergencia.

- Síntesis automática de primitivas de movimiento basada en la optimización de criterios recién introducidos.

15 años

- Planificación óptima del movimiento con retroalimentación para sistemas no lineales con obstáculos en diez o más dimensiones.

Teoría y técnicas unificadas para reducir las dimensiones topológicas, combinatorias y dimensionales.

Complejidades de los espacios de información.

Algoritmos que eliminan los límites artificiales entre detección, planificación, control y aprendiendo.

Mejoras dramáticas en el rendimiento en aplicaciones que utilizan planificación y control debido a primitivas sintetizadas automáticamente.

## 5. Colaboradores

Este informe fue el resultado de un taller sobre tecnologías y tendencias emergentes que tuvo lugar del 14 al 15 de agosto de 2008 en Snobird, Utah. El informe forma parte del estudio sobre robótica del Computing Community Consortium (CCC). El CCC está gestionado por la Computing Research Association (CRA) y patrocinado por la National Science Foundation (NSF). El presente informe ha sido escrito por los organizadores del taller y no elige la opción de CRA, CCC o NSF. La responsabilidad del informe recae enteramente en los autores.

El taller de la CCC sobre tecnologías y tendencias emergentes fue organizado por John M. Hollerbach, Universidad de Utah, Matthew T. Mason, Universidad Carnegie Mellon y Henrik I. Christensen, Instituto de Tecnología de Georgia. Al taller asistieron las siguientes personas del mundo académico y de la industria:

H. Harry Asada Instituto de Tecnología de Massachusetts	John M. Hollerbach Universidad de Utah	Metin Sitti Universidad de Carnegie mellon
Michael S. Branicky Universidad Case Western Reserve	Steven M. LaValle Universidad de Illinois	Gaurav S. Sukhatme Universidad del Sur de California
Craig R. Cariñena Universidad de Georgetown	Mateo T. Mason Universidad de Carnegie mellon	RussTedrake Instituto de Massachusetts de Tecnología
Henrik I. Christensen Instituto de Tecnología de Georgia	Bradley Nelson ETH Zúrich	Richard M. Voyles Universidad de Denver
Ronald S. Temiendo Universidad de California en Berkeley	Gill Pratt Colegio Olín	Mingjun Zhang universidad de tennessee
William Hamel universidad de tennessee	Arístides AG Requicha Universidad del Sur de California	
	Bryan P. Ruddy Instituto de Tecnología de Massachusetts	



