

MOOC IOT

Módulo 5. INTERNET DE LAS COSAS MÉDICAS

5.1 FUNDAMENTOS

Por Oresti Baños

Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores. Universidad de Granada.

1. Introducción

El quinto módulo de este curso está dedicado a uno de los ámbitos de aplicación más relevantes y esenciales de la tecnología IoT, la sanidad. El IoT está permitiendo una nueva forma de sistema sanitario, comúnmente definido como Internet de las Cosas Médicas (IoMT), con unas perspectivas tecnológicas, sociales y económicas revolucionarias. Este módulo tiene como objetivo ofrecer una visión general de los aspectos más relevantes del IoMT, para lo cual se vertebra en cuatro unidades:

- Fundamentos
- Tecnologías
- Aplicaciones
- Dificultades, retos y futuro.

La presente unidad introduce las bases sobre las que se fundamenta el IoMT. En la sección 2 se contextualiza la situación sanitaria actual y sus implicaciones socioeconómicas a corto y medio plazo. Seguidamente, en la sección 3 se define formalmente el concepto de IoMT.

2. La situación sanitaria

Tal y como sucede con cualquier otro ámbito social y económico, la sanidad global varía de forma significativa entre países. No obstante, existe un denominador común, y es que los sistemas sanitarios tradicionales son insuficientes para la demanda asistencial actual y futura. Situaciones como la pandemia global vivida en los últimos años no hacen más que demostrar la imperiosa necesidad sobre un cambio de modelo sanitario y asistencial. Para entender dicha necesidad, se realiza a continuación un breve resumen de alguno de los elementos más destacados en el reciente informe de salud global de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2021).

Cobertura asistencial

La mayoría de los países de la OCDE han logrado una cobertura universal (o casi universal) para un conjunto básico de servicios sanitarios, que suelen incluir consultas con médicos, pruebas y exámenes y atención hospitalaria. La cobertura de la población para los servicios básicos en 2019 se mantuvo por debajo del 95% en siete países de la OCDE, y por debajo del 90% en México y Estados Unidos. México ha ampliado la cobertura desde 2004, pero siguen existiendo lagunas. En Estados Unidos, las personas no aseguradas tienden a ser adultos en edad de trabajar con niveles de educación o ingresos más bajos. En Irlanda, aunque la cobertura es universal, menos de la mitad de la población tiene cubierto el coste de las visitas al médico de cabecera. Las recientes propuestas de reforma sugieren un despliegue gradual de la cobertura de la atención primaria a toda la población. Los sistemas nacionales de salud o los seguros sociales de salud han sido normalmente los sistemas de financiación para lograr la cobertura sanitaria universal. Unos pocos países han obtenido la universalidad a través de un seguro sanitario privado obligatorio, apoyado por subvenciones públicas y leyes sobre el alcance y la profundidad de la cobertura.

Satisfacción con los servicios sanitarios

Más allá de las tasas de cobertura de la población, la satisfacción con la disponibilidad de servicios sanitarios de calidad ofrece más información sobre la cobertura efectiva. Según la encuesta mundial de Gallup, la satisfacción con la disponibilidad de servicios sanitarios de calidad alcanzó una media del 71% en los 37 países de la OCDE en 2020. Los ciudadanos de Noruega (93%), Bélgica y los Países Bajos (ambos con un 92%) son los más satisfechos, mientras que los de Polonia (26%), Grecia (38%) y Chile (39%) son los menos satisfechos. España se encuentra justo por debajo de la media con un 70% de nivel de satisfacción (Figura 1).

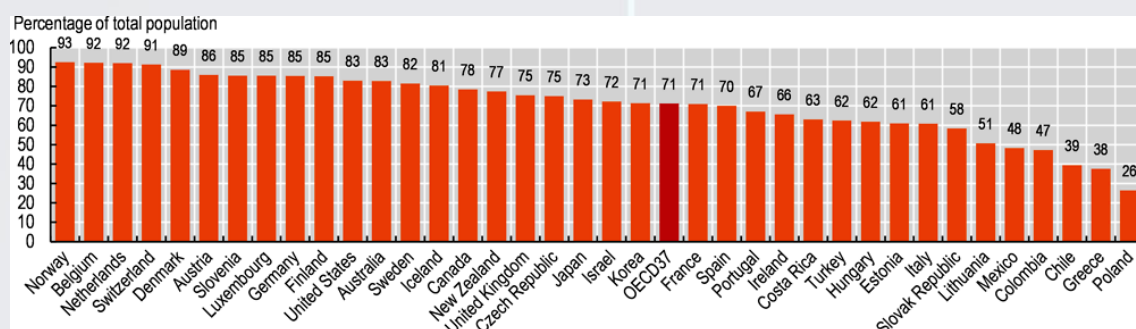


Figura 1: Nivel de satisfacción de la población con respecto a la disponibilidad y calidad de los servicios de salud de la región en la que viven. Datos de 2020. (Fuente: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/ae3016b9-en/1/3/5/1/index.html?itemId=/content/publication/ae3016b9-en&csp=ca413da5d44587bc56446341952c275e&itemIGO=oecd&itemContentType=book>)

Un principio fundamental en el que se basan todos los sistemas sanitarios de los países de la OCDE es proporcionar acceso a una atención de alta calidad a toda la población, independientemente de sus circunstancias socioeconómicas. Sin embargo, el acceso puede verse limitado por una serie de razones, como la escasa disponibilidad o asequibilidad de los servicios. Por lo tanto, las políticas

deben abordar tanto las barreras financieras a la atención como promover una oferta y distribución adecuadas de trabajadores sanitarios y servicios de atención sanitaria en todo el país.

En promedio, en los 27 países de la OCDE con datos comparables, solo el 2,6% de la población en 2019 informó que tenía necesidades de atención insatisfechas debido al costo, la distancia o los tiempos de espera. Sin embargo, en Estonia más del 15% de la población declaró tener necesidades asistenciales insatisfechas. La accesibilidad a la asistencia sanitaria también fue limitada en Grecia, donde alrededor del 8 % de la población declaró tener necesidades no cubiertas. En España, Luxemburgo, los Países Bajos, Alemania y Austria, menos del 0,5% de la población declaró necesidades no cubiertas de asistencia médica.

A lo largo del tiempo, en los 27 países de la OCDE, las necesidades insatisfechas de atención médica han disminuido en los últimos años, desde que alcanzaron un pico alrededor de 2014. Esta reducción se produjo principalmente entre los grupos de población de menores ingresos (una disminución de casi el 40% entre 2014 y 2019). Sin embargo, la brecha en las necesidades de atención médica insatisfechas entre los diferentes grupos de ingresos sigue siendo grande. En promedio en los 27 países de la OCDE, las personas en el quintil de ingresos más bajo tenían casi tres veces más probabilidades de reportar necesidades de atención médica insatisfechas que las del quintil de ingresos más altos en 2019. Además, la crisis del COVID-19 limitó el acceso a los servicios sanitarios en 2020 en la mayoría de los países de la OCDE. En promedio más de una de cada cinco personas declaró haber renunciado a un examen o tratamiento médico necesario durante los primeros 12 meses de la pandemia. Las necesidades insatisfechas de atención médica fueron mayores en Hungría y Portugal, donde más de un tercio de la población declaró haber renunciado a un examen o tratamiento médico necesario durante la primera oleada de la pandemia. La proporción de la población que renunció a la asistencia durante la pandemia fue comparativamente baja en Dinamarca, Austria y Alemania (menos del 15%). Un ajuste político para mantener el acceso a la asistencia durante la pandemia fue la adopción más amplia de servicios de telesalud.

Consultas clínicas

Las consultas con los médicos de atención primaria son, para muchas personas, el contacto más frecuente con los servicios sanitarios, y a menudo constituyen el punto de entrada para el tratamiento médico posterior. Las consultas pueden tener lugar en las clínicas de los médicos, en los departamentos ambulatorios de los hospitales o, en algunos casos, en los propios hogares de los pacientes. Cada vez más, las consultas también pueden tener lugar en línea y a través de videollamadas, mediante el desarrollo de las teleconsultas. En 2019, el número de consultas médicas presenciales por persona osciló entre menos de 3 en México, Costa Rica, Suecia, Colombia y Chile, y más de 17 en Corea. El promedio de la OCDE fue de 6,8 consultas por persona al año, y la mayoría de los países reportaron entre cuatro y diez. El número medio de consultas médicas por persona en los países de la OCDE se ha mantenido relativamente estable desde 2009. Sin embargo, algunos países han experimentado grandes aumentos a lo largo del tiempo (como Turquía, Lituania y Colombia). Las diferencias en las modalidades de prestación de servicios explican parte de la variación entre países. En Canadá, Finlandia, Irlanda, Nueva Zelanda, Suecia, el Reino Unido y los Estados Unidos, el número

relativamente bajo de consultas médicas puede explicarse en parte por el hecho de que las enfermeras y otros profesionales de la salud desempeñan un papel importante en la atención primaria, especialmente en la gestión de pacientes con enfermedades crónicas y en el tratamiento de pacientes con problemas de salud menores. Esto disminuye la necesidad de consultas médicas.

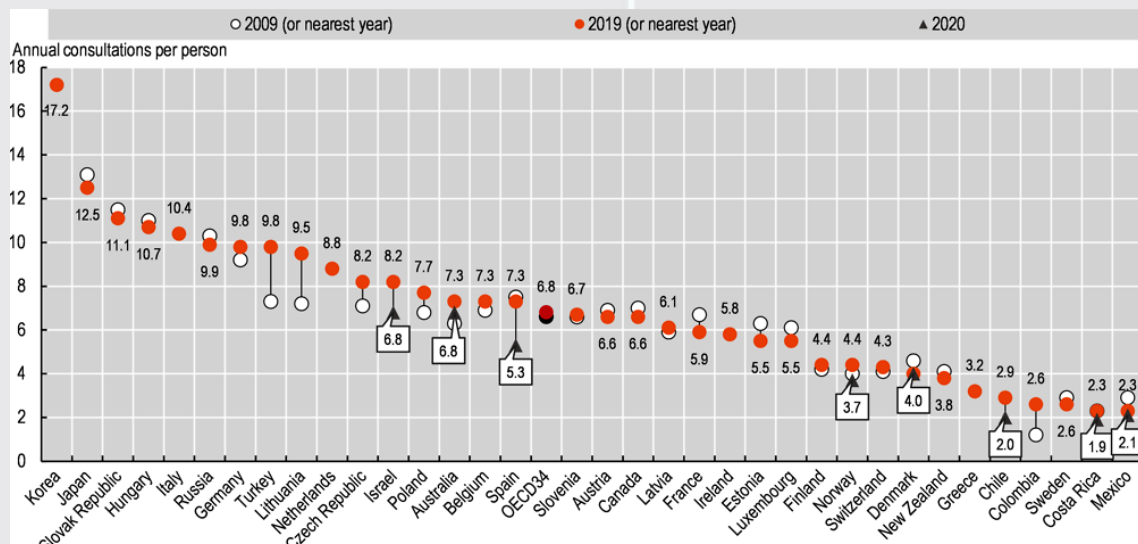


Figura 2: Promedio de número de visitas presenciales al médico por persona. (Fuente: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/ae3016b9-en/1/3/5/5/index.html?itemId=/content/publication/ae3016b9-en&csp=ca413da5d44587bc56446341952c275e&itemIGO=oecd&itemContentType=book>)

La COVID-19 también ha tenido un impacto sustancial en las consultas médicas. Las órdenes de permanecer en casa y la suspensión de la atención no urgente -sobre todo al principio de la pandemia- contribuyeron a reducir las consultas médicas, al igual que la reticencia de muchas personas a acudir a los centros de salud por temor a contraer el virus. Las consultas en persona se redujeron en torno al 30% en Chile y España, entre un 16 y un 17% en Costa Rica, Israel y Noruega, y algo menos del 10% en Australia y México, sin que se observaran cambios en Dinamarca. Sin embargo, el descenso de las consultas en persona se vio compensado en cierta medida por el aumento del número de teleconsultas.

Salud digital

Para proporcionar una atención segura, eficaz, receptiva y centrada en el paciente, que también sea rentable y accesible, es necesario que quienes toman las decisiones -desde los pacientes hasta los proveedores de atención sanitaria, los gestores y los científicos- dispongan de datos e información sanitarios oportunos y precisos. Cuando los datos y la información sanitaria son comprensibles y válidos para una serie de usos y usuarios, se hacen posibles nuevos servicios y aplicaciones de salud digital. Desde la telesalud hasta la inteligencia artificial, los nuevos servicios sanitarios digitales pueden conducir a un mejor acceso a la atención sanitaria y a una mayor satisfacción de los pacientes, especialmente entre aquellos que se enfrentan a más obstáculos para los servicios tradicionales de atención presencial (por ejemplo, los pacientes rurales). En los países de la OCDE se

está produciendo una transformación digital de la asistencia sanitaria, acelerada por la pandemia de COVID-19 e impulsada por la digitalización de la infraestructura de información, así como por la creciente demanda de los pacientes.

Muchos países de la OCDE están implantando historias clínicas electrónicas en hospitales o consultas médicas para sus pacientes. En 2021, una media del 93% de las consultas de atención primaria utilizan este tipo de historias en múltiples países de la OCDE. En 2012, una media del 70% de los consultorios de atención primaria utilizaban historias clínicas electrónicas (la composición de los países participantes difiere de un año a otro). Entre los países en los que la proporción de consultorios médicos que utilizan historias clínicas electrónicas se ha duplicado como mínimo desde 2012 se encuentran Canadá, Dinamarca y Japón.

En 16 de los 26 países de la OCDE en 2021, la mayoría de los pacientes pueden acceder a un portal de Internet donde pueden ver la información contenida en su historia clínica electrónicas. En 11 países de la OCDE, la mayoría de los pacientes también pueden interactuar con su registro (por ejemplo, modificando la información, añadiendo datos adicionales desde dispositivos o aplicaciones, o informando de resultados, experiencias o incidentes clínicos). Aproximadamente la mitad de los países conectan a los pacientes con sus proveedores de atención sanitaria a través de un portal para pacientes que facilita las teleconsultas (13 países), las videoconferencias (12 países) y el correo electrónico o los mensajes de texto seguros (11 países). Siete países también utilizan el portal para encuestar a los pacientes sobre sus experiencias y resultados.

Consultar a las personas sobre su atención y darles acceso a sus datos e información sanitaria son dimensiones clave de los sistemas sanitarios centrados en las personas. Tanto los pacientes como los proveedores están cada vez más interesados en utilizar herramientas digitales para mejorar la salud individual y ayudar a los pacientes a comprometerse con los sistemas sanitarios. Por término medio, en los 30 países de la OCDE, en 2020, el 59% de las personas de entre 16 y 74 años utilizaron Internet para buscar información sanitaria en los tres meses anteriores a la encuesta, frente al 36% en 2010. Sin embargo, hubo diferencias demográficas y socioeconómicas significativas en la búsqueda de información sanitaria en línea. Los adultos de mayor edad, las personas con menor nivel educativo y las que proceden de hogares con menores ingresos eran menos propensas a buscar información sanitaria en línea. La alfabetización sanitaria y digital es crucial para garantizar que la transformación digital no deje a ningún paciente atrás.

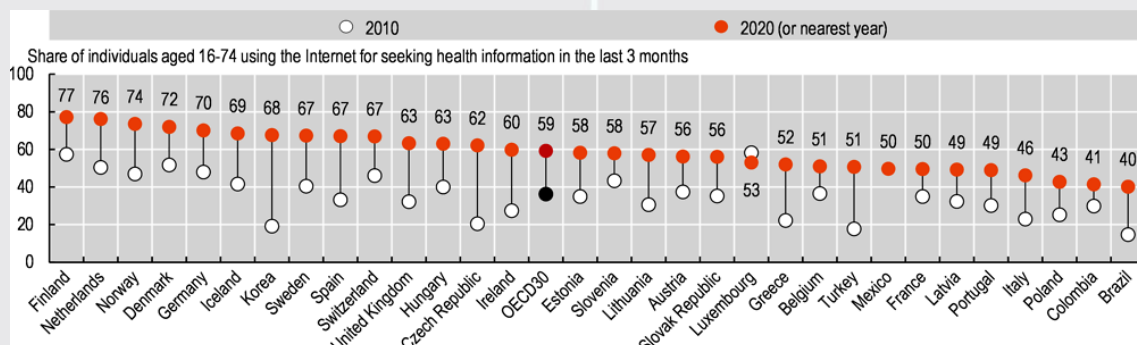


Figura 3: Porcentaje de adultos que buscan información médica online. (Fuente: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/ae3016b9-en/1/3/5/6/index.html?itemId=/content/publication/ae3016b9-en&csp=ca413da5d44587bc56446341952c275e&itemIGO=oecd&itemContentType=book>)

Con el inicio de la pandemia de COVID-19 y las consiguientes restricciones a la movilidad, el trabajo y las interacciones sociales, muchas más personas no pudieron recibir asistencia médica en persona. En 2019, antes de la pandemia, las consultas a distancia por teléfono o vídeo representaban menos del 10% de todas las consultas en Australia, Finlandia, Lituania, Noruega y Eslovenia. Dinamarca tenía la mayor proporción de consultas a distancia antes de la pandemia, con un 45%. Desde el comienzo de la pandemia, la proporción de adultos que declararon haber realizado una consulta médica en línea o por teléfono aumentó drásticamente: a mediados de 2020, casi uno de cada tres adultos había utilizado una consulta a distancia, proporción que aumentó a casi uno de cada dos a principios de 2021. Los países en los que el uso de las consultas a distancia era más alto a mediados de 2020 también tenían tasas de crecimiento más altas entre mediados de 2020 y principios de 2021, lo que indica una divergencia creciente.

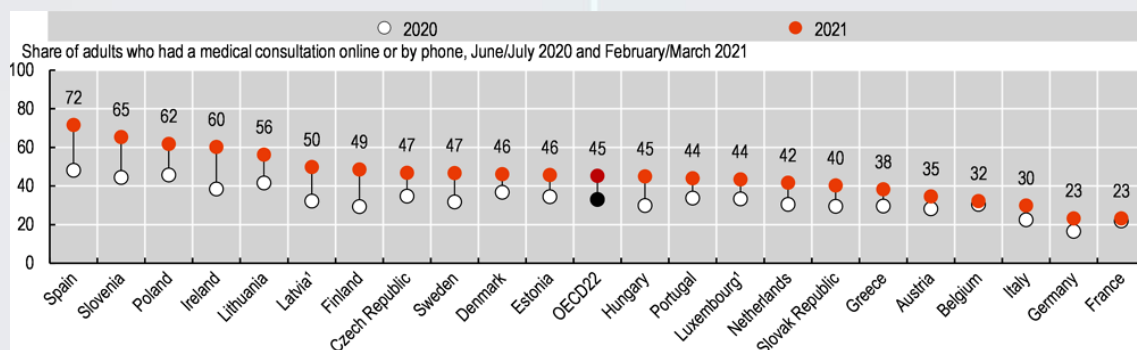


Figura 4: Porcentaje de adultos que recibieron teleasistencia médica desde el comienzo de la pandemia. (Fuente: <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/ae3016b9-en/1/3/5/6/index.html?itemId=/content/publication/ae3016b9-en&csp=ca413da5d44587bc56446341952c275e&itemIGO=oecd&itemContentType=book>)

3. El Internet de las Cosas Médicas (IoMT)

El mundo de las tecnologías de la información está avanzando rápidamente, contribuyendo a la innovación en salud e influyendo en el desarrollo de un mayor número de dispositivos médicos conectados que se utilizan para generar, acumular, enviar y analizar enormes volúmenes de datos sanitarios. Estos datos son una parte inevitable de un nuevo ecosistema cohesionado conocido como el Internet de los Cosas Médicas (IoMT). El IoMT es un subconjunto del IoT, a menudo denominado Internet de las Cosas de Salud, Internet de las Cosas Hospitalarias o Internet de las Cosas Asistenciales. Se trata de una estructura interconectada de dispositivos médicos o nodos, aplicaciones de software y sistemas y servicios sanitarios que transmiten datos en tiempo real a través de tecnologías de red.

Antes de que el IoT se introdujera en el ámbito de la salud, o dicho de otra forma, antes del IoMT, los pacientes utilizaban sistemas tradicionales de visita presencial a las clínicas de los médicos. En algunos casos más avanzados, se consideraba la posibilidad de hablar con los sanitarios de forma telefónica o a través de mensajes de texto, lo cual podría entenderse como uno de los gérmenes de la digitalización sanitaria, especialmente en lo que concierne a la atención al paciente. Sea como fuere, en estos sistemas convencionales ni los médicos ni los hospitales podían o pueden supervisar o hacer un seguimiento de la salud de los pacientes en tiempo real, y tampoco resulta posible por lo general ofrecer soluciones en tiempo real a los pacientes, al carecer de los dispositivos inteligentes ni de infraestructura necesaria para ofrecer dicho tipo de servicios sanitarios. Sin embargo, tras la incorporación del IoT al ámbito sanitario, las cosas han cambiado considerablemente. No solo se reduce la carga de trabajo general de la infraestructura sanitaria, sino que también es posible llevar a cabo el diagnóstico y seguimiento en tiempo real de los pacientes. La telemedicina y el seguimiento, así como la consulta en línea y en tiempo real, son algunos ejemplos que evidencian este cambio trascendental.

La atención sanitaria y los cuidados médicos son una parte esencial del ámbito del IoMT. Los dispositivos habilitados por la IoT han cambiado drásticamente la asistencia sanitaria al ofrecer nuevas posibilidades inimaginables años atrás, como la monitorización remota de los pacientes y la autogestión. Con estas tecnologías el médico puede ofrecer una atención excelente a sus pacientes, y éstos a su vez pueden hacer un seguimiento personal de su estado de salud. En función de dicho estado, el paciente puede adoptar nuevos estilos de vida y tomar las precauciones necesarias para prevenir el empeoramiento de su salud y bienestar. Gracias al IoMT, la interacción entre médicos y pacientes es más eficiente y sencilla, lo cual se traduce en un crecimiento significativo del nivel de satisfacción y compromiso de los pacientes. Además, un sistema de monitorización remota de la salud puede reducir la duración de la estancia en el hospital y los costes sanitarios. También puede mejorar los resultados del tratamiento y evitar que los pacientes vuelvan a ingresar en el hospital.

En los últimos años se ha observado un crecimiento masivo en los usos de los dispositivos inteligentes, incluyendo el ámbito de la salud. Se prevé que el valor del mercado de IoMT alcance los

140 millones de euros en 2022 (Deloitte Centre for Health Solutions, 2018). Eso es tres veces más que en 2017. Casi el 60 por ciento de todas las organizaciones sanitarias mundiales ya han implementado el Internet de las Cosas de una forma u otra. Se supone que otro 27 por ciento está pensando en adoptar la tecnología en breve. Diversos países también están planeando desplegar estos dispositivos inteligentes en casas y oficinas también. Por lo tanto, se puede decir que el futuro próximo es muy brillante para el IoMT y será útil para el bienestar público. Cada vez será más común ver hospitales inteligentes, telemedicina, ambulancias inteligentes, cirugías inteligentes y diagnósticos inteligentes.

El IoMT está llamado a desempeñar un papel vital en el área de la salud mediante la digitalización de los diferentes procesos involucrados en el proceso sanitario, especialmente en lo concerniente a la monitorización remota del paciente y su entorno, así como la simplificación de las interacciones entre los distintos agentes del sistema. La infraestructura del IoMT consta de un rico ecosistema de sistemas y aplicaciones, los cuales están ideadas para beneficiar tanto a los pacientes y sus familias como a los sanitarios y los hospitales:

- El IoMT para los **pacientes** consiste en diversos dispositivos inteligente wearables o vestibles, como bandas de fitness, relojes inteligentes y otros dispositivos con conexión inalámbrica (por ejemplo, control de la presión arterial, control de la frecuencia cardíaca, glucómetro, etc., que están disponibles ya en el mercado. Estos dispositivos inteligentes se utilizan normalmente para realizar una monitorización y seguimiento personalizado y continuado en el tiempo. Con la ayuda de estos dispositivos inteligentes, se pueden establecer recordatorios y alertas sobre el recuento de calorías en un día, el control del ejercicio, las variaciones en el nivel de la presión arterial, las citas u otros.
- En el IoMT para las **familias** la información sobre el paciente se transmite a sus familiares en tiempo real. Con la ayuda de los dispositivos portátiles y otros dispositivos inteligentes inalámbricos, es posible realizar un seguimiento, por ejemplo, de los ancianos y los niños pequeños en cualquier momento y desde cualquier lugar. En caso de emergencia, la información se comparte en tiempo real para que se puedan gestionar y planificar diversas acciones preventivas e incluso en casos críticos poder salvar la vida de los familiares.
- Con respecto al IoMT para los **médicos** son también diversos los dispositivos inteligentes vestibles y equipos de monitorización doméstica que permiten al especialista hacer un seguimiento más eficiente de la salud del paciente. En caso de emergencia médica, la información sobre el paciente se transmite tanto a sus familiares como al médico, lo que permite a estos tomar decisiones más informadas y adecuadas en tiempo y forma.
- En el IoMT para **hospitales** se pueden automatizar múltiples funcionalidades del sistema utilizando equipos inteligentes basados en sensores. El IoMT permite el seguimiento en tiempo real de equipos médicos como desfibriladores, sillas de ruedas, bombas de oxígeno y otros equipos de enfermería. También se puede hacer un seguimiento del personal médico en tiempo real. En la infraestructura de IoMT es posible la gestión de la higiene a través de dispositivos de trazo de la limpieza, lo que previene que los pacientes sufran por ejemplo infecciones. La gestión de los activos, como el control del inventario de medicamentos y la

enfermería ambiental, como el control automático de la temperatura y la humedad de los sistemas de climatización, son otros ejemplos de aplicaciones directas del IoMT en el ámbito hospitalario.

La estructura típica del IoMT consta de cuatro etapas o pasos (Figura 5). El sistema IoMT inteligente debe construirse de manera que los datos sean detectados o procesados en una etapa y produzcan valores en la etapa siguiente. En el primer paso se produce el despliegue y la recogida de datos de dispositivos heterogéneos interconectados, como actuadores, sensores, monitores, cámaras, detectores, etc. En el segundo paso se reciben los datos de los diferentes sensores o dispositivos habilitados para el registro en forma de señales analógicas o digitales, las cuales se convierten y agregan de forma numérica para su análisis y tratamiento posterior. En el tercer paso, se realiza el preprocesamiento y la normalización de los datos digitalizados y agregados. En el cuarto paso, la información depurada se traslada al centro de la base de datos de salud o a la nube. En el quinto y último paso, se realiza un análisis avanzado de los datos procesados para obtener soluciones eficaces y una toma de decisiones efectiva.

Sensado a través de dispositivos médicos inteligentes

Agregación y sincronización de datos

Preprocesamiento y normalización de datos

Persistencia de datos armonizados

Análisis avanzado de datos

Figura 5: Pasos o etapas principales del IoMT.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el IoMT presenta un nuevo paradigma con múltiples oportunidades para desarrollar y ejecutar de forma efectiva servicios sanitarios que son difícilmente realizables a través de los mecanismos e infraestructuras tradicionales. En este sentido, existen una serie de características que confieren al IoMT la capacidad para trascender con respecto a los servicios sanitarios actuales, proveyendo los fundamentos para el denominado sistema sanitario inteligente. A continuación, se detallan algunas de las características más destacadas del IoMT.

Interacción entre el sistema y el ser humano

Con la ayuda de IoMT, humanos y sistemas pueden interactuar entre sí. Este es uno de los elementos clave de los sistemas basados en IoMT. Los dispositivos y los humanos interactúan a través de diversas interfaces y canales de comunicación digital, tanto de forma explícita, por ejemplo, a través de una videollamada, o implícita, en el caso de usar algún tipo de dispositivo de monitorización del estado de salud y bienestar. Además, los datos generados tanto en el ámbito de la atención sanitaria como en la vida diaria del paciente son accesibles tanto para el paciente como para el médico. En un sistema IoMT, la interacción entre humanos solo es posible si la interacción entre humanos y sistemas lo es. Por lo tanto, se puede decir que el IoMT tiene entre sus objetivos principales conferir dicha capacidad de comunicación entre los sistemas digitales y los humanos.

Rendimiento del sistema

El IoMT es capaz de proporcionar un rendimiento mejorado o más robusto del sistema debido a su cercanía con la ciberinfraestructura y los sensores. Con el proceso de retroalimentación y rediseño automático, se puede mejorar el rendimiento del sistema sanitario inteligente. El IoMT cuenta con subsistemas cibernéticos y recursos computacionales que permiten dar soporte a numerosos dispositivos de sensado, lenguajes de programación, mecanismos de comunicación y mantenimiento, lo que permite mejorar en general el rendimiento general del sistema.

Escalabilidad

La infraestructura de IoMT es escalable, lo que significa que puede ampliarse el sistema añadiendo nuevos recursos a medida que aumenta la demanda asistencial. Todo ello es alcanzable sin necesidad de una reformulación de la infraestructura para cualquier incorporación de nuevos recursos en el sistema, lo que incide en una reducción de los costes globales. Además, con la ayuda de la infraestructura IoMT se pueden realizar los distintos procesamiento de forma distribuida en dispositivos conectados heterogéneos (por ejemplo, teléfonos inteligentes, servidores dedicados o la nube), lo cual ofrece la posibilidad de utilizar recursos de forma oportunística.

Flexibilidad

Los sistemas basados en IoMT son más flexibles que los anteriores en la adopción de tecnologías como la computación en la nube y las redes de sensores inalámbricos con funcionalidades avanzadas. El IoMT, al igual que su alter ego el IoT, está diseñado para ofrecer total compatibilidad con la gran cantidad de tecnologías de comunicación y procesamiento de datos actuales y del futuro, generando un amplio ecosistema para dar soporte a prácticamente cualquier tipo de solución sanitaria y asistencial.

Tiempo de respuesta más rápido

Con un procesamiento rápido y la capacidad de comunicación tanto en la infraestructura local como en la nube, el tiempo de procesamiento general de IoMT se minimiza. Esta respuesta más rápida

permite utilizar de forma más eficaz los recursos compartidos. También puede ayudar a facilitar la detección temprana y eficaz de los fallos.

Si bien el IoMT es un subconjunto del IoT, existen ciertas diferencias entre ambos paradigmas que merece la pena destacar. En la Tabla 1, y como prelude a una descripción más detallada en la siguiente unidad, se listan de forma general las principales diferencias.

IoT	IoMT
Generalmente desplegado sobre grandes zonas geográficas y orientado a un único propósito	Normalmente desplegado un pequeño área geográfica, sobre o alrededor del cuerpo humano o en un entorno clínico
Sus fuentes de energía pueden incluir la solar y eólica. En caso de usar nodos estacionarios (habitual), estos pueden ser alimentados de forma continua	Los nodos pueden obtener energía también a partir del cuerpo humano, por ejemplo, usando su calor o movimiento
Monitoriza el ambiente, logística, procesos industriales, etc.	Especialmente orientado a la monitorización de señales vitales del cuerpo humano
Es deseable que los nodos sean pequeños, pero dependiendo de la aplicación pueden variar de tamaño	Los nodos deben ser cuanto más pequeños posibles para evitar ser molestos al paciente o usuario
Normalmente son sistemas estáticos	Esencialmente sistemas móviles en tanto en cuanto están asociados al cuerpo humano
El despliegue de los nodos sensores es relativamente fácil	El despliegue de los sensores es particularmente difícil sobretodo cuando se usan sensores implantables, ya que requieren de cirugía
La integridad de los datos se suele tratar de mantener	Los datos deben ser preservados y transmitidos con total integridad

Tabla 1: Principales diferencias entre el IoT y el IoMT.

4. Bibliografía

Deloitte Centre for Health Solutions. (2018). Medtech and the Internet of Medical Things. How connected medical devices are transforming health care. London: Deloitte.

OECD. (2021). Health at a Glance 2021: OECD Indicators. Paris: OECD Publishing. Obtenido de <https://www.oecd.org/health/health-at-a-glance/>

Tzanis, G. (2018). Healthcare data analysis in the Internet of things era. En Encyclopedia of Information Science and Technology. IGI Global.

Módulo 5. INTERNET DE LAS COSAS MÉDICAS

5.2 TECNOLOGÍAS

Por Oresti Baños

Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores. Universidad de Granada.

1. Introducción

La presente unidad tiene como objetivo describir los principales aspectos tecnológicos asociados al IoMT. Para ello, en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se introduce de forma general la estructura y funcionamiento de los sistemas IoMT. A continuación, se describe en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la infraestructura más habitual sobre la que operan estos sistemas, mientras que en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan algunos ejemplos de los dispositivos inteligentes de salud más habituales en el IoMT. Seguidamente, en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se describe en profundidad las diferentes partes de la arquitectura IoMT y finalmente se culmina la unidad presentando en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los principales aspectos de seguridad a tener en cuenta en los sistemas IoMT.

2. Sistema

Tal y como se ha visto en la unidad anterior, el paradigma del IoMT es bastante novedoso y reciente, lo cual determina que no exista una única visión o conceptualización de los sistemas IoMT. No obstante, existen una serie de características y funcionalidades que se asocian a la mayoría de estos sistemas, los cuales los definen y diferencian de otros. El arquetipo primario de un sistema IoMT viene determinado por la recolección, tratamiento y generación de los datos. Así, los datos se recogen mediante diversos dispositivos inteligentes o basados en sensores. De forma más concreta, los datos pueden generarse y recibirse fundamentalmente de equipos médicos (p. ej. electroencefalógrafo), biosensores (p. ej. glucómetro), sensores vestibulares (p. ej. pedómetro o contador de pasos), gadgets inteligentes (p. ej. sensor de temperatura y humedad) y registros electrónicos del hospital. Estos dispositivos producen datos médicos heterogéneos en forma de señales fisiológicas, autoregistros de pacientes o datos clínicos obtenidos de la base de datos sanitaria. Si el dato procede directamente del dispositivo o se toma de los registros sanitarios, entonces el sistema IoMT normalmente guarda una copia en la base de datos local o en la nube para su uso posterior. Después, los datos se sirven a la unidad central de procesamiento para que realice tareas de procesamiento o genere nuevos resultados diagnósticos o conocimiento a partir de estos. El procesamiento se realiza típicamente utilizando técnicas de minería de datos, procesamiento de la señal y algoritmos de aprendizaje automático. Una vez completada la tarea de procesamiento, el resultado se comunica al proveedor de servicios sanitarios o al paciente, dependiendo de la naturaleza e interés de la información generada. En todos los niveles, desde el sensado o la

recopilación de datos hasta el nivel de servicio, son necesarios mecanismos de seguridad adecuados, ya que cualquier acceso no autorizado puede causar graves daños al sistema sanitario inteligente y a la salud del individuo. La seguridad es una parte esencial de los sistemas IoMT porque los datos pertenecen a los registros de salud electrónica de la persona, lo que significa que la información personal sobre los individuos se registra aquí y no debe ser compartida públicamente. Los datos que proceden de los distintos dispositivos sanitarios se analizan en el extremo del proveedor de servicios, y la información se comparte con las autoridades o los usuarios correspondientes.

3. Infraestructura

La infraestructura desempeña un papel vital en la mejora del rendimiento y la calidad del sistema IoMT. Se requiere una infraestructura que pueda dar soporte y satisfacer las necesidades del dominio médico con la capacidad de integración del sistema para facilitar las aplicaciones inteligentes basadas en el IoMT. Principalmente, la infraestructura para el sistema IoMT debe estar diseñada para soportar tanto el funcionamiento basado en la nube como el basado en servidores. La basada en la nube es adecuada tanto para los tipos de arquitectura grandes como para los pequeños, pero la basada en el servidor solo es capaz de soportar arquitecturas pequeñas. Esta última necesita un mantenimiento adecuado, frente a la basada en la nube que proporciona algunas funcionalidades adicionales como la accesibilidad, la rentabilidad y la escalabilidad. De este modo, se puede hacer redimensionar y provisionar el sistema dependiendo de las necesidades que vayan surgiendo y el número de usuarios y servicios a considerar. Por ejemplo, un pequeño centro clínico especializado en aspectos de fisioterapia y con una clientela concreta puede preferir una infraestructura local basada en un servidor, el cual puede dar cobertura a las necesidades del centro a corto y medio plazo. Por contra, un hospital con múltiples áreas clínicas, con diferentes aplicaciones y dispositivos de monitorización, y con un número variable de pacientes y personal sanitario, puede beneficiarse mucho más de una infraestructura basada en la nube la cual pueda ajustarse a las necesidades de cada momento dependiendo de la demanda.

4. Dispositivos

El número y variedad de dispositivos inteligentes de monitorización dentro del IoMT es enorme, en un mercado que no para de crecer y reinventarse. A continuación, y a título ilustrativo, se presentan algunos ejemplos de estos dispositivos y sus principales usos.

Glucómetro inteligente

La diabetes es una de las enfermedades metabólicas más prevalentes y en la actualidad una enfermedad muy común. En la diabetes, el nivel de glucosa en la sangre varía de forma más o menos irregular durante periodos de diversa duración. Un estilo de vida acelerado como resulta cada vez más habitual entre la población no deja tiempo suficiente para visitar los laboratorios clínicos y hacer pruebas que permitan medir los niveles de glucosa en sangre. Además, en los casos más críticos, es de especial importancia medir de forma continua los niveles de glucosa, ya que los picos pueden producirse en cualquier momento. Este reto motiva a los investigadores y a las organizaciones a construir dispositivos IoMT inteligentes que permitan monitorizar el nivel de glucosa de los individuos y que además les ayude a hacer el plan de dieta, la medicación y las actividades físicas, en

consecuencia. Un ejemplo de este tipo de dispositivos son los denominados glucómetros inteligentes tipo flash, los cuales están compuestos por un sensor y un lector. El sensor tiene un catéter que se coloca mediante un aplicador y se mantiene el contacto con la piel mediante un adhesivo, de modo que se mide de forma continua la glucemia en líquido intersticial. El lector se pasa por encima del sensor o parche y en cuestión de segundos se obtiene el valor de glucosa (Figura 6).



Figura 6: Dispositivo de monitorización inteligente para medir niveles de glucosa. (Fuente: <http://www.endocrino.cat/es/blog-endocrinologia.cfm/ID/11239/ESP/sistema-flash-freestyle-libre-.htm>)

Electrocardiógrafos inteligentes

ECG son las siglas de electrocardiograma, uno de los métodos utilizados para controlar la salud del corazón y que también se utiliza en el diagnóstico médico de enfermedades cardíacas. Las personas que padecen este tipo de patologías necesitan exámenes de vez en cuando. Estos problemas motivan a los investigadores y a las organizaciones a construir dispositivos IoMT inteligentes que pueda monitorizar las señales de ECG y, en base a ello, se pueda controlar la salud del corazón individual. También ayuda en el diagnóstico de varios problemas relacionados con el corazón, como intervalos QT prolongados, isquemia miocárdica y arritmias multifacéticas. Muchos dispositivos vestibles como las bandas inteligentes incluyen electrodos que permiten medir estas señales de ECG. Existen también otras tecnologías como las basadas en fotopletismografía que son habitualmente utilizadas en las pulseras y relojes inteligentes, las cuales no ofrecen una medida de la señal de ECG propiamente pero permiten obtener estimaciones indirectas de la misma con un alto grado de precisión.

Termómetro inteligente

Hoy en día, la monitorización de la temperatura corporal es una parte vital de los servicios sanitarios inteligentes. Por lo tanto, se necesitan dispositivos o aplicaciones inteligentes para controlar la temperatura corporal de las personas. Normalmente, no hay tiempo suficiente en el día a día para hacer estas mediciones con regularidad. Si se habla de escenarios hospitalarios, son necesarios dispositivos inteligentes poco invasivos para monitorizar la temperatura corporal de pacientes

críticos. En este sentido, existen soluciones también basadas en dispositivos inteligentes vestibles que permiten medir de forma rápida y continua la temperatura corporal (Figura 7).



Figura 7: Reloj inteligente que incorpora un sensor para medir la temperatura corporal. (Fuente: <https://www.gizmochina.com/2020/04/17/ticwris-gts-smartwatch-measures-real-time-body-temperature-to-prevent-covid-19/>)

Oxímetro inteligente

La monitorización del nivel de oxígeno es una de las tareas importantes de los servicios sanitarios inteligentes. Por ello, es preciso utilizar dispositivos o aplicaciones de monitorización inteligentes para controlar el nivel de oxígeno tanto de personas sanas como enfermas. Los hospitales también necesitan dispositivos inteligentes que puedan controlar continuamente el nivel de oxígeno de los pacientes. Para ello se utilizan los denominados oxímetros de pulso los cuales miden de manera indirecta la saturación de oxígeno de la sangre roja de un paciente sin necesidad de extraer una muestra de sangre. En sus versiones inteligentes, estos dispositivos son totalmente portables y se pueden conectar a dispositivos móviles facilitando la integración con otros servicios y aplicaciones del IoMT (Figura 8).



Figura 8: Oxímetro inteligente conectado a dispositivo móvil. (Fuente: <https://ihealthlabs.eu/es/14-oximetro-conectado-ihealth-air-85511003910.html>)

5. Arquitectura

La arquitectura de los sistemas IoMT hereda ampliamente el modelo de capas común en el IoT. Concretamente la arquitectura del IoMT se compone de cuatro capas: la capa de sensado, la capa de red, la capa de procesamiento, y la capa de aplicación. Seguidamente se describen cada una de estas capas desde la perspectiva concreta del IoMT.

Capa de sensado

La capa de sensado es la primera capa o capa de más bajo nivel del sistema IoMT. En ella se desempeñan todas las tareas relacionadas con el registro o medición de datos de salud o clínicos. El sensado puede considerarse como una entidad física esencial del sistema IoMT. Los sensores biomédicos u otros dispositivos que incorporan sensores se encargan de recoger los datos físicos y fisiológicos de los pacientes, que se utilizan posteriormente en las etapas de procesamiento y comunicación para determinar las posibles necesidades o respuestas al problema de salud del individuo. Esta capa es bastante crítica, ya que la calidad y rapidez de las medidas realizadas tiene un impacto directo en la capacidad de decisión en capas superiores de la arquitectura IoMT.

El proceso de sensado consta de tres elementos fundamentales: el tipo de sensor, el parámetro sensado y el método de sensado.

- Tipo de sensor. Las aplicaciones sanitarias inteligentes utilizan numerosos tipos de sensores heterogéneos, desde simples sensores inerciales para medir el movimiento corporal hasta otros más complejos que permiten determinar el pulso o la presión arterial. El número y los tipos de sensores pueden ser específicos de la aplicación o condición clínica monitorizada, lo que significa que pueden variar entre diferentes aplicaciones y pacientes. Para controlar el estado de salud del paciente, se pueden utilizar sistemas de medición de uno o varios

parámetros en función de la aplicación y del tipo de sensor. Como sabemos, el sistema IoMT consta de un gran número de sensores. Por lo tanto, la complejidad del sistema depende de la naturaleza de la estrategia de detección utilizada en las aplicaciones basadas en IoMT. Para mejorar el rendimiento del sistema y la capacidad de toma de decisiones, es crucial analizar eficientemente la información multidimensional que proviene de los distintos sensores.

- **Parámetro sensado.** La especificación de los parámetros físicos y fisiológicos a medir desempeña un papel fundamental a la hora de elaborar mecanismos de comunicación y procesamiento óptimos. Para las aplicaciones sanitarias personales, un sistema de un solo parámetro es muy adecuado, pero para una monitorización detallada, como en el hospital, resulta necesario un sistema de múltiples parámetros. Con la ayuda de dispositivos vestibles y otros dispositivos de sensores inalámbricos, se puede monitorizar información esencial como el nivel de oxígeno, la frecuencia cardíaca, el flujo sanguíneo, las actividades musculares, la frecuencia respiratoria, la inclinación del cuerpo y los patrones de movimiento, entre otros. Estos datos de entrada individuales se registran y almacenan en estructuras de datos multiparamétricas de cara a facilitar su posterior envío y tratamiento.
- **Método de sensado.** No solo existe variedad en la tipología de sensores y en el modo de operación de estos (frecuencia de muestreo, rango dinámico de medida, naturaleza del dato registrado, etc.) sino que, dependiendo del contexto del paciente, puede ser más indicado usar diferentes métodos de sensado. Así, por ejemplo, la ubicación del paciente juega un papel relevante en el proceso de sensado. Los sensores ubicados en el ambiente o fijos son especialmente indicados para lugares como el hogar, la oficina o el hospital, mientras que los sensores vestibles son especialmente idóneos para lugares abiertos o donde resulta difícil ubicar sensores fijos. Asimismo, la captación de los datos puede realizarse tanto de forma activa como pasiva. Por ejemplo, los datos de la electrocardiografía se obtienen mediante una detección activa, en la que el sujeto debe hacer uso del dispositivo de medida durante un tiempo. Otras magnitudes se registran de forma pasiva, por ejemplo, el periodo de sueño a partir de los sensores inerciales del dispositivo vestible. Para mejorar la eficiencia del sistema IoMT resulta necesario establecer métodos de sensado adecuados y bien definidos para las características y el estilo de vida de cada paciente.

Capa de red

La capa de red es la segunda capa del sistema IoMT. En ésta se llevan a cabo todas las tareas relacionadas con la comunicación y la seguridad, incluyendo la selección de protocolos apropiados con mecanismos de seguridad adecuados.

La comunicación es una tarea clave en cualquier sistema inteligente. Sin ella, no se puede interactuar entre los dispositivos ni transmitir los datos del origen al destino. Para el sistema basado en IoMT, la comunicación se vuelve más crucial debido a la heterogeneidad de los dispositivos, los sensores y el análisis de datos en tiempo real. Por lo tanto, es necesario un mecanismo de comunicación que pueda hacer frente a estas situaciones de la mejor manera posible. El proceso de comunicación consta de dos elementos fundamentales: el tipo de protocolo y la planificación.

- Tipo de protocolo. La interacción o comunicación entre sensores o dispositivos heterogéneos solo es posible a través de protocolos de comunicación. Estos protocolos determinan aspectos tan importantes como la velocidad de transmisión de los datos, el medio de transporte o los pasos que debe seguir tanto el emisor como el receptor. Los protocolos de comunicación pueden categorizarse en centralizados, descentralizados y jerárquicos, dependiendo de si existen entidades que se encarguen de designar quién y cuándo se pueden enviar datos, como sucede en los modelos maestro-esclavo. El sistema IoMT puede incluir una amplia gama de dispositivos sensores heterogéneos. Por lo tanto, resulta necesario utilizar protocolos de comunicación adecuados para establecer una comunicación fiable y eficiente.
- Planificación. El proceso mediante el cual se gestionan los recursos de la comunicación basado en el tiempo se conoce como planificación. Es una de las tareas esenciales en el sistema IoMT. Se utiliza para realizar las tareas de comunicación en tiempo y forma para alcanzar el mayor nivel de satisfacción posible por parte de los usuarios. Los tres pilares de la tarea de programación son el control de concurrencia, la planificación de tareas y la gestión de datos. Estos pilares son responsables de realizar la transacción en tiempo real de los datos de los sensores dentro del límite de tiempo requerido. La planificación de la comunicación puede ser asíncrona, como en el caso de los modelos de publicación-suscripción en los que un sensor (publicador) manda el dato cuando registra un nuevo valor y lo hace disponible a todas aquellas entidades que estén interesadas en ese dato (suscriptor), o síncrona, para aquellos modelos en los que se solicita cada cierto tiempo fijo un nuevo dato al sensor, independientemente de si la magnitud medida ha cambiado o no.

La seguridad es una cuestión primordial para asegurar los datos personales y sensibles relacionados con la salud de los pacientes desde una perspectiva ética y legal. Por lo tanto, al diseñar la arquitectura IoMT para aplicaciones sanitarias, debemos prestar especial atención a la privacidad y seguridad de los datos. La seguridad consta de dos elementos, el nivel de encriptación y el nivel de privacidad.

- Cifrado. En las aplicaciones basadas en IoMT hay diversos usuarios, tanto pacientes como personal sanitario, de modo que para establecer una comunicación segura entre ellos se necesitan mecanismos de encriptación de datos. El mecanismo de encriptación de datos se elige normalmente dependiendo de los requisitos de seguridad y del dominio de la aplicación. El cifrado de datos puede realizarse tanto a nivel de red como a nivel de usuario. Si se utilizan servidores basados en la nube que ya están protegidos por mecanismos de seguridad eficientes, solo se necesita seguridad a nivel de usuario. Algunos mecanismos de cifrado destacados de encriptación basada en atributos (ABE, Attribute-based Encryption) pueden utilizarse para cifrar los datos, y solo el personal autorizado con las claves adecuadas tiene la capacidad de descifrarlos. Es muy importante tener en cuenta que cualquier exposición de los datos personales o relacionados con la salud de un paciente podría causar problemas legales y éticos, tanto a las entidades responsables del uso de las infraestructuras IoMT como a los propios diseñadores e implementadores de los sistemas. Por lo tanto,

resulta muy necesario usar mecanismos de seguridad que permitan hacer frente a estos desafíos relacionados con la seguridad y la privacidad de los datos en las aplicaciones basadas en IoMT.

- Privacidad. La comunicación en los sistemas IoMT se realiza a tres niveles, concretamente el nivel de los datos, el nivel de la aplicación y el nivel del proveedor de servicios. Si se habla de la privacidad de los datos, resulta necesario proveer seguridad en dos niveles, el de los datos y el de la aplicación. El nivel de datos consiste en los registros de salud del paciente y la información personal, que va al nivel de la aplicación directamente o se transmite a través de los proveedores de servicios. Por lo tanto, se hace necesario aportar seguridad a nivel de usuario para proteger los datos personales de los pacientes. La seguridad a nivel de aplicación consiste en asegurar los hallazgos o diagnósticos basados en los registros de salud del paciente asociados a la información personal y que van al nivel de usuario directamente o se transmiten a través de los proveedores de servicios. Ello determina que sea importante aplicar mecanismos de seguridad a nivel de aplicación para asegurar la información personal del paciente y los resultados clínicos más críticos.

Capa de procesamiento

La capa de procesamiento es la tercera capa del sistema IoMT. En esta capa se realizan todas las tareas relacionadas con la gestión de datos y el cómputo de resultados, incluyendo desde el almacenamiento y preparación de los datos hasta el uso de técnicas avanzadas de ciencia de datos para su análisis.

La arquitectura del IoMT debe ser capaz de manejar los problemas relacionados con la gestión de datos. Los datos de un sensor u otros dispositivos inteligentes pueden encontrarse en diferentes tamaños y tipos. Así, en función de los tipos de sensores y de su área de aplicación, uno puede encontrar sensores que producen datos pequeños, como el sensor de temperatura corporal, frente a otros dispositivos que generan datos de mayor tamaño, como las imágenes de resonancia magnética. La gestión de los datos es una tarea crítica y compleja en los sistemas de asistencia sanitaria inteligente también porque son múltiples los dispositivos basados en sensores generando datos en paralelo, y en muchos casos, en tiempo real. Ello determina que la gestión de los datos debe realizarse de forma rápida y continua, lo cual es una tarea bastante difícil. La gestión de datos en los sistemas basados en el IoMT consiste en estrategias predefinidas aplicadas a los datos recogidos para cumplir con los requisitos del usuario. Los datos generados por los sensores están en formato crudo y pueden no ser útiles hasta el preprocesamiento, que requiere un cómputo eficiente y un ancho de banda masivo, por lo general. Asimismo, la integración y persistencia de los datos también es necesaria para facilitar futuras investigaciones y usos. Por lo tanto, las estrategias de gestión de datos son esenciales y deben aplicarse adecuadamente.

La gestión de datos se caracteriza fundamentalmente a través de el tipo de almacenamiento, el medio de procesamiento y la integración de los datos:

- Tipo de almacenamiento. Se refiere a la fuente de datos donde se van a almacenar o de donde se extrae la información. Se utilizan dos tipos de estrategias de almacenamiento de

datos, siendo la primera un esquema de almacenamiento central, y la segunda un esquema de almacenamiento distribuido. En el primer caso, los datos son almacenados en el servidor central de salud, mientras que en el segundo caso, los datos son guardados en múltiples dispositivos de almacenamiento o bases de datos. El almacenamiento centralizado puede ser útil en entornos pequeños donde la tasa de generación de datos sea reducida. No obstante, este tipo de almacenamientos suelen ser menos robustos a posibles pérdidas de datos y/o ataques, en cuyo caso es preferible usar sistemas distribuidos redundantes. En todo caso, es necesario usar estrategias de gestión adecuadas en cada tipo de almacenamiento para que el sistema sea eficiente y sencillo para el procesamiento de datos en tiempo real.

- Medio de procesamiento. Hay diversas formas de llevar a cabo el procesamiento de datos en un sistema basado en IoMT. La primera es el procesamiento de datos basado en la red, en el que hay que proporcionar los datos de los conjuntos de datos locales a un canal de comunicación o procesamiento, el cual es responsable del procesamiento de los datos. La segunda es el procesamiento de datos basado en la estación base, en el que los datos de los centros sanitarios o de las bases de datos globales de salud se deben facilitar a los canales de comunicación o procesamiento responsables del procesamiento de datos. El último es el procesamiento de datos basado en la nube, en el que se deben proporcionar los datos desde el almacenamiento en la nube a los canales de comunicación o procesamiento para el procesamiento de datos.
- Integración de datos. Es uno de los procesos críticos de la gestión de datos en los sistemas basados en IoMT. Consiste en combinar los datos de las diferentes fuentes, fundamentalmente sensores y datos clínicos, de cara a proporcionar a los usuarios una vista unificada de ellos. La inclusión de datos en el sistema basado en IoMT es posible de dos maneras, mediante una integración combinada y mediante una integración individual. En el proceso de integración combinada, los datos procedentes de sensores heterogéneos o dispositivos basados en sensores se capturan y mezclan en un único archivo para su posterior procesamiento. En el proceso de integración individual, se capturan los datos de diferentes sensores y se almacenan en archivos separados para su posterior procesamiento. La información procedente del proceso de integración combinada se utiliza en aplicaciones de asistencia médica, en las que interviene un gran número de sensores y parámetros, y se ofrecen diversos servicios. Los datos procedentes del proceso de integración individual se utilizan normalmente para aplicaciones de atención sanitaria personal.

Algunas funcionalidades, como la monitorización remota en tiempo real de los pacientes, ayudan a los médicos y a los clínicos a cuidarlos. Esta facilidad de seguimiento y monitorización en tiempo real ha mejorado la capacidad de cálculo del sistema sanitario. La integración con la computación en la nube permite realizar tareas de cálculo grandes y complejas, facilitando la integración de dispositivos móviles, la computación de alto rendimiento, diferentes entornos operativos, etc. El cómputo en los sistemas IoMT se relaciona directamente con dos elementos destacados: el seguimiento de los resultados de la monitorización y el tipo de modelado.

- Seguimiento de los resultados. La monitorización de los pacientes es importante en el sistema basado en IoMT para la detección e identificación de resultados clínicos, los cuales sirven de base para el diagnóstico y tratamiento médico. Los resultados obtenidos a partir del procesamiento de los datos registrados del paciente pueden clasificarse en tres tipos: estado de salud, cuidados intensivos y cuidados de la vida diaria. El estado de salud consiste en la monitorización de la salud media del paciente, y entra dentro de la monitorización personal, lo que significa que la persona monitoriza su estado de salud con la ayuda de dispositivos basados en sensores (por ejemplo, un sensor inercial vestibular inteligente para contar el número de pasos realizados al día). Los cuidados intensivos se basan en la monitorización de la salud médica u hospitalaria con la ayuda de sensores de alto grado clínico (por ejemplo, un sensor de electrocardiografía de alta resolución). Los cuidados de la vida diaria no son más que la monitorización de las actividades de salud e higiene individual del día a día a través de dispositivos inteligentes basados en sensores (por ejemplo, un cepillo de dientes inteligente que recopila información sobre el tiempo de cepillado, número de repeticiones, etc.).
- Tipo de modelado. Se distinguen dos tipos de modelado para los sistemas basados en el IoMT: el modelado individual y el modelado grupal. En el modelado individual, el modelo de cómputo se basa en el modelado específico para cada usuario, esto es, el modelo de cálculo se plantea de forma particular o personalizada para cada paciente para controlar su salud. Si bien está concebido desde una perspectiva individual, el modelo específico de la aplicación puede utilizarse para varios pacientes que padecen las mismas enfermedades. En el modelado grupal se definen modelos generalistas que aplican a una población heterogénea. El modelado individual permite desarrollar soluciones más precisas, la denominada medicina de precisión, pero también es más costoso a nivel de recursos. El modelado generalista es más cercano a las soluciones clínicas usadas tradicionalmente y, si bien es computacionalmente más ligero, tiene como contrapartida el ser menos efectivo que el individual.

Capa de aplicación

La capa de aplicación es la cuarta y última capa del sistema IoMT, donde se realizan todas las tareas de control-actuación y de aplicación, es decir, la toma de decisiones y el control de la aplicación.

El sistema sanitario actual se enfrenta a una eficacia ciertamente limitada en la detección de las emergencias basada en los registros o datos de salud del paciente. El paradigma del IoMT plantea diversos mecanismos para identificar este tipo de emergencias o situaciones críticas a partir del procesamiento de los datos registrados a través de los sensores, en lo que podría definirse como proceso de control. Esta información es usada a su vez para generar posibles alarmas, recomendaciones y acciones para los pacientes y los sanitarios, en lo que se define como actuación. Los procesos de control y actuación se caracterizan por el tipo de mecanismo y el modelo de toma de decisiones.

- Tipo de mecanismo de control-actuación. En el sistema basado en el IoMT se utilizan dos tipos de mecanismos de control y actuación: automático y manual. En el modo automático, el sistema debe diseñarse de forma que se puedan incorporar todas las tareas relacionadas con el control, como el procesamiento de datos y la búsqueda de resultados. En los sistemas automáticos, todas las soluciones y recomendaciones las ofrece el sistema basándose en sus experiencias pasadas y en la retroalimentación proporcionada por el paciente, su entorno y el personal sanitario. En el modo manual, todo el tratamiento lo realiza directamente el especialista médico y, en función de sus resultados, se ofrecen ciertas recomendaciones o sugerencias a los pacientes. Existen también mecanismos de control-actuación híbridos que combinan las posibilidades ofrecidas por ambos.
- Toma de decisiones. La toma de decisiones en los sistemas basado en IoMT pueden llevarse a cabo en base a dos métodos: unos basados en parámetros individuales y otros fundamentados en parámetros múltiples. La toma de decisiones basada en un solo parámetro se realiza basándose en los datos de un solo sensor, como la medición de la presión arterial, la temperatura, el nivel de oxígeno, el nivel de glucosa en sangre, etc. Así, por ejemplo, se puede recomendar al paciente realizar algunos ejercicios de respiración cuando el nivel de oxígeno detectado es menor del habitual. Por otra parte, la toma de decisiones basada en múltiples parámetros se realiza en función de varios parámetros, es decir, la decisión se toma utilizando los datos de múltiples sensores. Un ejemplo de esta modalidad podría referirse al caso en el que se le recomienda al paciente relajarse varios minutos cuando se detecta unas pulsaciones exacerbadas a la vez que se identifica que la persona no está realizando ninguna actividad energéticamente demandante que justifique dichas pulsaciones.

Tal y como se verá en unidades posteriores de este módulo, los sistemas basado en IoMT ofrecen una gran variedad de servicios y aplicaciones como la asistencia a la vida diaria, los hospitales inteligentes o la rehabilitación remota, entre otras. Pues bien, se puede decir que en gran medida la complejidad del sistema depende de las funcionalidades de las aplicaciones. Así, los elementos de control deben incluirse en la arquitectura mientras se construye un entorno crítico en la unidad de cuidados intensivos para hospitales. Los componentes electrónicos también deben incluirse en la arquitectura mientras se construye una aplicación personal como una casa inteligente asistida. Las aplicaciones basadas en el IoMT se categorizan en dos tipos dependiendo para quién estén destinadas: las aplicaciones de nivel usuario y las aplicaciones de nivel avanzado.

- Nivel de usuario. Las aplicaciones a nivel de usuario consisten en diversas soluciones para ayudar a mejorar o mantener la salud del individuo mediante el uso de los dispositivos inteligentes de monitorización. Este tipo de aplicaciones de asistencia personal, como los sistemas de monitorización de la salud en el hogar, ayudan a la monitorización en tiempo real de las personas mayores. Los datos registrados son visibles para los pacientes, sus familiares y los médicos asociados. En el caso de algunas de estas aplicaciones deben diseñarse de forma que, en caso de emergencia médica, la información llegue a los familiares y al médico correspondiente.

- Nivel avanzado. Las aplicaciones de nivel avanzado consisten en soluciones que se utilizan en hospitales o ámbitos médicos. Estas aplicaciones están formadas por varios biosensores heterogéneos y homogéneos y otros sistemas o dispositivos basados en sensores. Algunas aplicaciones de atención médica en esta categoría consisten en hospitales inteligentes y cuidados intensivos inteligentes en los que el médico puede controlar a distancia la salud de los pacientes, así como interactuar con el personal de enfermería y otro personal médico en cualquier emergencia médica. Otras aplicaciones, como la gestión inteligente de medicamentos e inventarios para hospitales, son otros ejemplos que benefician tanto a los hospitales, su personal y a los pacientes.

6. Bibliografía

Baker, S. B. (2017). Internet of things for smart healthcare: Technologies, challenges, and opportunities. IEEE Access, 5, 26521-26544.

Ghubaish, A. S.-A. (2020). Recent advances in the internet-of-medical-things (IoMT) systems security. IEEE Internet of Things Journal, 8(11), 8707-8718.

Koutras, D. S. (2020). Security in IoMT communications: A survey. Sensors, 20(17), 1-49.

Manogaran, G. V. (2018). A new architecture of Internet of Things and big data ecosystem for secured smart healthcare monitoring and alerting system. Future Generation Computer Systems, 82, 375-387.

Módulo 5. INTERNET DE LAS COSAS MÉDICAS

5.3 APLICACIONES

Por Oresti Baños

Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores. Universidad de Granada.

1. Introducción

La presente unidad tiene como objetivo describir los principales usos asociados actualmente al IoMT. Para ello, en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se describen algunos de los principales servicios facilitados a través de las tecnologías del IoMT. Seguidamente, en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran una serie de aplicaciones destacadas las cuales se articulan a través del IoMT.

2. Servicios

El campo de la asistencia sanitaria es muy amplio. Se trata de un conjunto de sistemas eminentemente complejos, los cuales deben integrarse y adaptarse a la intervención de diversos agentes, algo que representa una tarea muy desafiante. Esto hace que la inclusión de los hospitales, los pacientes, los médicos, el equipamiento clínico y el resto del personal médico, todo bajo un mismo paraguas, sea un requisito esencial de la infraestructura IoMT. Por ello, tal y como se explicó en unidades anteriores, cada módulo de este sistema debe estar correctamente construido y desplegado, facilitando el desarrollo continuo y rápido que permita hacer de este tipo de infraestructura una entidad robusta, duradera y versátil. Es especialmente la versatilidad del IoMT la que permite a este nuevo paradigma dar soporte a una gran cantidad de servicios orientados tanto al paciente como al resto de agentes asistenciales y de bienestar. Algunos de los principales servicios facilitados por el IoMT se presentan a continuación.

Vida diaria asistida por el entorno

Este es uno de los servicios más destacados que ofrecen los sistemas basados en el IoMT. La vida diaria asistida por el entorno (AAL del inglés Ambient Assisted Living) se refiere a las soluciones tecnológicas que ayudan a las personas con discapacidades o con edad avanzada a llevar una vida más independiente o que permiten una vida autónoma hacia la vejez. De hecho, el AAL es útil por lo general para las personas mayores, los discapacitados físicos y las personas que padecen algunas enfermedades graves, aunque también puede considerarse para el público en general. Las tecnologías empleadas en el AAL se basan fundamentalmente en sensores y actuadores dispuestos estratégicamente en la vivienda del usuario. Los sensores permiten obtener datos en tiempo real tanto del entorno como de los habitantes (por ejemplo, la temperatura de una habitación o la ocupación de una estancia concreta). Estos datos son utilizados en combinación con sistemas

expertos para actuar en caso de ser necesario (por ejemplo, enviar una alerta a un familiar en caso de detectar una caída del usuario de la vivienda).

La automatización de viviendas y edificios puede contribuir a cumplir el deseo de independencia de mayores y discapacitados realizando importantes funciones en segundo plano y protegiendo a las personas. Esto no solo ayuda a los residentes, sus familiares también se benefician de la tranquilidad de que todo está en orden. De hecho, los datos registrados en el entorno se transmiten de los pacientes a los médicos y a otros miembros de la familia en caso de cualquier actividad inusual o emergencia. El canal de comunicación utilizado para la transmisión de datos debe ser seguro, con técnicas de mecanismos de seguridad eficientes. Así, cualquier persona no autorizada no podrá acceder a la información personal de los pacientes. Asimismo, es importante que la instrumentación del entorno sea lo más transparente posible para minimizar la intrusión en las rutinas cotidianas de los usuarios (Figura 9). Con la ayuda de este tipo de sistemas, los usuarios pueden controlar sus datos y gestionar su estilo de vida, en consecuencia, permitiendo hacer que ésta sea más fácil y normal.



Figura 9: Ejemplo del aspecto ideal de un entorno instrumentalizado transparente al usuario (Fuente: <https://www.pexels.com/es-es/foto/manos-mujer-animal-casa-4064423/>)

Salud infantil

El IoMT ofrece varios servicios relacionados con el cuidado de los niños. Con este sistema digital inteligente, podemos por ejemplo seguir y controlar al niño desde cualquier lugar en tiempo real. Un ejemplo de ello, cada vez más común, es el servicio ofertado por algunos centros de cuidados para niños o guarderías, los cuales permiten a los padres visualizar en tiempo real la actividad y situación de sus hijos a través de cámaras instaladas en el entorno y conectadas a internet. Los padres tienen

acceso al vídeo a través de una aplicación móvil o interfaz web típicamente protegida por mecanismos de autenticación avanzados. Asimismo, existen pulseras inteligentes que permiten registrar ciertas medidas fisiológicas del niño y alertar a los padres en caso de detectar una convulsión o ataque epiléptico (Figura 10). Este tipo de tecnologías son de especial utilidad en aquellas situaciones en las que los progenitores o tutores deben ausentarse temporalmente del domicilio o no tienen visión directa del niño (por ejemplo, durante el descanso). En caso de detectar cualquier tipo de emergencia, se puede manejar la situación de manera efectiva e instantánea tomando medidas preventivas.



Figura 10: Uso de pulseras inteligentes para monitorización de convulsiones en niños (Fuente: <https://www.empatica.com/embrace2/>)

Dispositivos vestibles inteligentes

Los dispositivos vestibles inteligentes (típicamente denominados wearables) constituyen un pilar fundamental dentro del IoMT. En efecto, son ampliamente usados y se están convirtiendo en una parte esencial de la vida de las personas. Normalmente ofrecen servicios para el cuidado personal, desarrollados para el seguimiento y monitorización de la salud personal con la ayuda de sensores u otros dispositivos inteligentes basados en ellos. Los relojes inteligentes (smartwatches) y las bandas y pulseras inteligentes son algunos de los dispositivos más utilizados y aceptados globalmente. Permiten registrar diversas señales físicas y fisiológicas útiles como el ritmo cardíaco, la presión arterial, la cantidad de calorías quemadas, el tiempo de sueño, etc., y también se puede personalizar su configuración según las necesidades del usuario. Es habitual contar con aplicaciones que facilitan fijar ciertos objetivos o metas en función de las características y necesidades del usuario, así como poder visualizar datos y gráficas en tiempo real para mejorar el estado de salud individual (Figura 11).



Figura 11: Reloj inteligente utilizado para monitorizar diferentes funciones vitales (Fuente: <https://www.pexels.com/es-es/foto/sano-mujer-mano-conexion-4498483/>)

Robótica quirúrgica

Las tecnologías robóticas se utilizan habitualmente para realizar diversas cirugías en el ámbito de la sanidad. Tras el enorme crecimiento de los dispositivos inteligentes basados en el IoMT, el campo médico está adoptando soluciones robóticas no sólo para las operaciones, sino también en procesos de rehabilitación (Figura 12) o incluso para tratar a varios pacientes al mismo tiempo.



Figura 12: Sistema robótico empleado en un tratamiento (Fuente: <https://www.pexels.com/es-es/foto/hombre-gente-tecnologia-retrato-8439063/>)

Acceso médico semántico

El acceso médico semántico basado en el IoMT es un sistema fundamentado en servicios que ofrecen información médica sobre enfermedades y sus consecuencias. Así, los usuarios pueden entender las enfermedades subyacentes, los medicamentos que deben tomar, las precauciones a adoptar y cualquier otra información relacionada. Todo ello puede resultar de especial utilidad a la hora de ayudar a elaborar una tabla de dietas, una charla sobre ejercicios, horas de sueño, etc. También puede ayudar en la correcta interpretación de señales vitales típica como la presión arterial, la frecuencia cardíaca, el nivel de oxígeno, el nivel de glucosa, entre otros. Podría decirse que el fin último de este tipo de servicio es mejorar la educación clínica de la población general, así como tener pacientes mucho más informados.

Control de los efectos (secundarios) de los medicamentos

Los medicamentos juegan un papel vital para las personas y un consumo adecuado suele proporcionar los mejores resultados. No obstante, un uso incorrecto puede causar serias complicaciones y ser en general perjudicial para la salud. Por lo tanto, para hacer frente a estas situaciones, surgen en este contexto sistemas de control de la reacción a los medicamentos basados en el IoMT, de forma que el paciente puede comunicarse con los médicos en cualquier momento y desde cualquier lugar. Pero no solo eso, sino que, a diferencia de los sistemas tradicionales, se puede obtener información esencial sobre los medicamentos y monitorizar su ingesta, así como medir de forma continua los efectos secundarios de los mismos en el comportamiento y fisiología del paciente.

Apoyo en emergencias

Los sistemas de apoyo en emergencias basado en el IoMT proporcionan información en tiempo real de los pacientes a sus familiares en caso de emergencia. Con ellos es posible realizar un seguimiento en tiempo real para que, en caso de accidente o cualquier otra crisis, se pueda rastrear a las personas y enviarles apoyo inmediato, lo que en muchos casos podrá ayudar a salvar la vida de los individuos. Este tipo de sistemas es especialmente beneficioso para las personas mayores, los niños o los individuos que padecen algunas enfermedades crónicas que puedan ser susceptibles de producir una situación de riesgo crítico, como ciertas cardiopatías, trombosis cerebrales o problemas pulmonares.

3. Aplicaciones

Tal y como se ha descrito en la sección anterior, el IoMT facilita la puesta en marcha y ejecución de una gran variedad de servicios relevantes en el ámbito sanitario y asistencial. De la misma forma, las destacadas posibilidades ofrecidas por este nuevo paradigma tecnológico permiten el desarrollo de novedosas aplicaciones orientadas a facilitar la tarea clínica, así como el estado de salud del paciente. Algunas de las principales aplicaciones del IoMT se presentan a continuación.

Sistema de rehabilitación inteligente

Millones de personas a nivel mundial, incluidos aquellos en edad de trabajar, necesitan atención fisioterapéutica cada vez más y de forma más frecuente. Esta cifra continuará creciendo debido al número cada vez mayor de personas de edad avanzada, lo cual tiene una repercusión directa sobre los sistemas sanitarios actuales, sometidos cada vez más a una presión mayor. Si bien resulta más habitual que los pacientes realicen parte de su rehabilitación en casa, las máquinas de ejercicio para favorecer la terapia de rehabilitación disponibles actualmente no proporcionan por lo general un tratamiento eficaz. Esto es debido a que cada paciente requiere un entrenamiento a medida. Además, los pacientes necesitan un fisioterapeuta formado, lo que motiva que existan largas listas de espera, un bajo cumplimiento con los ejercicios de rehabilitación y una falta de datos precisos sobre el progreso del paciente. En este contexto surgen los sistemas de rehabilitación inteligente, los cuales consisten normalmente de máquinas de ejercicio instrumentalizadas con sensores para medir la ejecución de los ejercicios, así como interfaces computarizadas para poder proporcionar realimentación al paciente acerca de la correcta o no realización de los ejercicios prescritos (Figura 13). Este tipo de sistemas es asimismo particularmente beneficioso para las personas con discapacidades físicas, mejorando su capacidad funcional y proporcionándoles una mejor calidad de vida. Por ejemplo, aquellas personas que sufren de algún tipo de dificultad motora o limitación en la movilidad debido a una enfermedad o accidente pueden beneficiarse de ejercicios de reacondicionamiento guiados y monitorizados automáticamente por un sistema de rehabilitación inteligente.



Figura 13: Sistema de rehabilitación inteligente (Fuente: <https://cordis.europa.eu/article/id/386833-an-intelligent-at-home-exercise-device-improves-patient-rehabilitation-outcomes>)

Gestión inteligente de la medicación

La gestión inteligente de la medicación es una de las cuestiones más críticas en la aplicación basada en el IoMT. Este tipo de gestión es posible a través de los denominados dispensadores electrónicos inteligentes, los cuales consisten típicamente en sistemas robóticos que administran de forma automática la dosis de medicación al paciente en el momento correspondiente. Normalmente incluyen interfaces amigables basadas en video y/o voz con funcionalidades importantes como la generación de recordatorios o llamadas a la atención del paciente en caso de que éste no tome la medicación adecuadamente (Figura 14). Este tipo de aplicación se considera vital porque está directamente asociada a la salud humana, y la no correcta administración de cualquier dosis de medicamento puede causar graves consecuencias en la salud del paciente. Además, el uso de los sistemas de gestión inteligente de la medicación también puede ayudar a controlar el efecto del medicamento en la salud de los pacientes, tal y como se describió en la sección anterior. En general, con la ayuda de este tipo de aplicación, el paciente y sus familiares pueden hacer un seguimiento eficaz del horario y la dosis de la medicación.



Figura 14: Dispensador de pastillas inteligente (Fuente: <https://pillohealth.com>)

Gestión inteligente de sillas de ruedas

La silla de ruedas inteligente es una de las soluciones basadas en el IoMT para personas con discapacidades físicas, tanto transitorias como permanentes. Esencialmente, estos sistemas consisten en sillas de ruedas instrumentalizadas que contienen sensores para registrar continuamente el movimiento y posicionamiento de la silla. Este tipo de funcionalidad es bastante importante en entornos hospitalarios y residenciales, tanto desde una perspectiva logística como de operacionalización. Por ejemplo, el sistema puede dirigir al sanitario hacia la silla disponible más cercana ahorrando tiempo y esfuerzo. Esto permite en general la optimización de recursos, de parámetros y de estrategias en el entorno hospitalario. Asimismo, con la ayuda de los sensores de la silla se puede rastrear la ubicación del paciente en caso de emergencia. Fuera del contexto hospitalario, la silla de ruedas inteligente puede ser usada para análisis del comportamiento del paciente, por ejemplo, para determinar las distancias recorridas en aquellas sillas impulsadas directamente por la acción de los brazos de las personas.

Soluciones inteligentes de salud móvil

Existen múltiples soluciones asistenciales y sanitarias definidas a través de aplicaciones móviles, muchas de las cuales están siendo utilizadas por los diferentes agentes del sistema de salud. En los últimos años se ha apreciado un enorme crecimiento no solo en el mercado de los teléfonos inteligentes sino también en el desarrollo de este tipo de aplicaciones de asistencia sanitaria. Las aplicaciones de salud móvil inteligente se clasifican fundamentalmente en aplicaciones de diagnóstico, aplicaciones de información de medicamentos, aplicaciones de literatura de salud, aplicaciones de asistencia médica remota, calculadoras de salud y aplicaciones de interacción clínica con el experto (Figura 15).



Figura 15: Multiplicidad de soluciones de salud móvil (Fuente: <https://mhealthintelligence.com/news/amid-a-flood-of-new-mhealth-apps-xcertia-looks-to-set-standards>)

Diagnóstico inteligente de enfermedades

El diagnóstico de enfermedades es una de las aplicaciones críticas en los sistemas basados en IoMT. Con la ayuda de aplicaciones inteligentes de diagnóstico de enfermedades, es posible la detección de las mismas. Éste se basa fundamentalmente en el registro de datos fisiológica y conductual del paciente a través del uso de diversos biosensores. Dichos datos son procesados utilizando técnicas de aprendizaje automático e inteligencia artificial los cuales permiten elaborar modelos de diagnóstico, detección temprana e incluso predicción del origen o desarrollo de una enfermedad. La aplicación puede diagnosticar la enfermedad basándose en sus conocimientos y experiencias pasadas, pero la decisión final la toma únicamente un experto en salud. Este tipo de aplicaciones también es útil para gestionar la escasez de personal médico. Basándose en la recogida de datos en tiempo real, tanto el médico como el paciente pueden controlar la evolución de su salud en tiempo real.



Figura 16: Aplicación smartwatch para detección de patologías cardíacas (Fuente: <https://medium.com/macoclock/apple-watch-5-probably-saved-my-life-99d929cb8581>)

4. Bibliografía

Calvaresi, D. C. (2017). Exploring the ambient assisted living domain: a systematic review. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 8(2), 239-257.

Dian, F. J. (2020). Wearables and the Internet of Things (IoT), applications, opportunities, and challenges: A Survey. *IEEE Access*, 8, 69200-69211.

Kim, J. C. (2019). Wearable biosensors for healthcare monitoring. *Nature biotechnology*, 37(4), 389-406.

Módulo 5. INTERNET DE LAS COSAS MÉDICAS

5.4 DIFICULTADES, RETOS Y FUTURO

Por Oresti Baños

Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores. Universidad de Granada.

1. Introducción

En unidades anteriores se ha descrito la tecnología y aplicaciones del IoMT. No obstante, como cualquier otro paradigma, existen ciertas complejidades y barreras que deben ser tenidas en cuenta a la hora de desarrollar nuevos sistemas IoMT. Esta unidad tiene por tanto como objetivo describir algunas de las principales limitaciones del paradigma IoMT, así como las líneas de trabajo en las que se enmarca el devenir a medio y largo plazo de este campo. Para ello, en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se describen las principales dificultades y retos asociados al IoMT, mientras que en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan algunos de los campos de trabajo futuro del IoMT.

2. Dificultades y retos

La adopción de nuevas tecnologías suele venir acompañada de ciertas dificultades y retos que deben ser tenidos muy en cuenta. Estas dificultades y retos pueden encontrarse en varias etapas, desde la etapa de desarrollo hasta la etapa de despliegue y puesta en marcha. Tal y como se puede inferir de lo descrito en unidades anteriores, la multiplicidad de escenarios de aplicación, heterogeneidad de sistemas de comunicación y sensores, y la naturaleza de los datos de salud recopilados y transmitidos, hacen del diseño y el despliegue de la infraestructura IoMT una tarea ardua y desafiante. En esta sección se describe una lista detallada de las principales dificultades y retos, desde aspectos que conciernen a las limitaciones en recursos computacionales y de energía, a problemas relacionados con la escalabilidad, interoperabilidad, seguridad o privacidad, entre otros.

Limitación computacional y de memoria

La mayoría de los dispositivos IoMT están caracterizados por una baja capacidad de cálculo, o dicho de otra forma, cuentan con un procesador de baja velocidad. Por lo tanto, la potencia de cálculo de estos dispositivos inteligentes es limitada, determinando que realizar las operaciones utilizando estos dispositivos es costoso y lento. Asimismo, los dispositivos IoMT incorporan poca memoria de acceso rápido. Esta memoria es fundamental a la hora de realizar tratamiento de datos a nivel local, algo habitual en los sistemas que operan en el extremo. No obstante, dicha memoria suele gestionar el sistema operativo, las bibliotecas de aplicaciones y el software del sistema para la recolección de datos y su transmisión, lo cual deja poco margen para poder implementar, por ejemplo, técnicas de

inteligencia artificial que suelen ser costosas tanto en términos de memoria como a nivel de cómputo.

Limitación de energía

La limitación de energía es uno de los principales retos de los sistemas IoMT. Una infraestructura típica de IoMT es un entramado de varios dispositivos de salud inteligentes basados en pequeños y compactos sensores con una batería limitada. Cuando el sensor se encuentra en una situación de poco uso, estos dispositivos pueden ahorrar energía entrando en el denominado modo de ahorro de energía, cambiando el funcionamiento de la unidad de procesamiento a baja velocidad para poder minimizar el consumo total. No obstante, dependiendo de la aplicación esto no es siempre posible ya que tiene implicaciones directas sobre la capacidad de cómputo y el procesamiento normal de los datos. Además, algunos dispositivos IoMT son fácilmente recargables mientras que otros presentan más dificultades. Así, por ejemplo, los dispositivos inteligentes vestibles pueden recargarse tras un periodo de funcionamiento, pero los sensores de monitorización implantables en el cuerpo humano requieren una batería de larga duración para mantener su funcionamiento a largo plazo, ya que las baterías de estos sensores no pueden sustituirse o recargarse con frecuencia. Esto determina que el desarrollo de fuentes de baterías para sensores implantables sea un área de investigación muy lucrativa, especialmente en lo referente a la fabricación de nuevos materiales seguros para su uso dentro del cuerpo. Se necesitan soluciones novedosas para una intervención mínima en el cuerpo (She, 2019), ayudando a evitar el desarrollo de efectos secundarios perjudiciales.

En la actualidad, algunas soluciones ofrecen un funcionamiento sin baterías utilizando las características de la anatomía humana para alimentar los sensores y los módulos de transmisión, como en (Ma, 2018). Estas soluciones pueden prolongar la vida de los nodos en el ecosistema IoMT. No obstante, se necesitan más soluciones de bajo coste para implementar metodologías de recolección eficientes sin causar ningún daño al usuario. Asimismo, también se necesitan técnicas de carga eficientes y rápidas para complementar estas soluciones.

La utilización eficiente de los recursos energéticos existentes es igualmente necesaria. Se necesitan sistemas operativos ligeros para el funcionamiento de los sistemas WBAN con escasez de energía (Zikria, 2019). Del mismo modo, la gestión eficiente de los recursos es necesaria para mejorar la vida útil de la red. La ventaja de tener una arquitectura distribuida, como en el caso del sistema de niebla y de borde, incluye la conservación de la energía, ya que el consumo de energía para la transmisión de corto alcance es menor que la transmisión de largo alcance. Resulta por tanto muy importante diseñar una red que se sirva de recursos energéticos distribuidos para optimizar el uso de la energía, así como para mantener la disponibilidad y la seguridad.

Movilidad

En la infraestructura del IoMT, los dispositivos inteligentes se conectan desde varias redes y pueden ser de naturaleza móvil. Dichas conexiones son habitualmente a través de Internet utilizando múltiples proveedores de servicios. Por ejemplo, en el caso de los dispositivos inteligentes vestibles, como los monitores cardíacos o los sensores de temperatura, estos están conectados a través de

Internet, a la vez que potencialmente comparten información con diversos servicios de salud. Estos dispositivos son móviles, en tanto en cuanto los usuarios que los portan puede cambiar la ubicación y la conexión de red de los dispositivos. Es por ello que es importante utilizar mecanismos eficientes y robustos que permitan pasar de una red a otra evitando posibles desconexiones y especialmente asegurando el correcto envío y recepción de los datos de salud.

Escalabilidad

Como ya se ha comentado en unidades anteriores, en los últimos años se ha experimentado un rápido crecimiento en el número de sensores utilizados en el sistema sanitario inteligente o en los paradigmas IoMT. Se puede esperar por tanto que un gran volumen de dispositivos se va a conectar con la red global en el corto-medio plazo. Esto hace de especial importancia desarrollar tecnologías que permitan lidiar con el ingente volumen de datos que dichos dispositivos van a generar, tanto desde el punto de vista del procesamiento y el almacenamiento, como de su transmisión y seguridad. Algunas tecnologías actuales como la computación de altas prestaciones, el big data, el 5G y la ciberseguridad avanzada proporcionan los mecanismos necesarios para abordar la mayoría de estos aspectos. No obstante, es importante continuar progresando en el desarrollo de los mismos para ofrecer plenas garantías cuando el IoMT se encuentre en una fase de implantación más avanzada.

Interoperabilidad

El IoMT es un entramado de dispositivos heterogéneos, que van desde los más pequeños (implantables) hasta una amplia gama de dispositivos (equipamiento clínico). Estos dispositivos pueden ser diferentes en cuanto a tamaño, capacidad de cálculo, utilización de la energía, usos de la memoria y software integrado. Además, los dispositivos inteligentes pueden comunicarse entre sí utilizando un protocolo de red propio o comunicarse con los proveedores de servicios IoMT utilizando redes IP. Por ello, es necesario construir sistemas en los que los dispositivos IoMT heterogéneos puedan integrarse de forma que también sean capaces de intercambiar información entre sí. La interoperabilidad de los dispositivos médicos es consecuentemente uno de los retos más importantes que hay que afrontar.

Topología dinámica de la red

En la infraestructura del IoMT, cualquier dispositivo inteligente puede unirse a la red sanitaria global o local en cualquier momento y lugar, y estos aparatos inteligentes también pueden abandonar el sistema sin notificación o con la información adecuada. Este comportamiento espacial y temporal de los dispositivos hace que la topología de la red sea dinámica. Esto determina que sea un reto construir un modelo de seguridad basado en la topología dinámica de la red, que sea adecuado para toda la variedad de sistemas dinámicos cumpliendo los requisitos de seguridad avanzados.

Flujo de datos

La gestión del flujo de datos siempre ha sido una tarea difícil en todas las tecnologías emergentes. En el ámbito de la sanidad se ha convertido en un reto aún mayor, ya que los datos pertenecen a la información personal de los individuos y no pueden compartirse públicamente. Así que, teniendo esto en cuenta, la infraestructura basada en el IoMT debe diseñarse de manera que maneje

cuidadosamente el flujo de operación y transmisión de datos entre los diversos dispositivos y sistemas basados en el IoT. Este tipo de práctica también ayudará a mejorar el rendimiento general del sistema.

Despliegue en entornos reales

La mayoría de las arquitecturas sanitarias basadas en IoT están en su fase inicial. Muchas infraestructuras basadas en IoT se encuentran en las fases de diseño e implementación, y algunas están funcionando con instalaciones o despliegues mínimos. La implementación práctica desempeña un papel vital en la construcción de soluciones avanzadas y eficaces que ofrezcan una idea de su uso en escenarios reales. También resulta de gran ayuda para identificar los problemas o cuestiones abiertas que requieran una mayor investigación y desarrollo. Enfrentarse a escenarios en tiempo real en el día a día de los cambios en el estilo de vida es una tarea desafiante debido a su complicada naturaleza.

Generación de información de salud en tiempo real

Los datos recogidos por los sensores se procesan para obtener información sobre el estado de salud del usuario. La cantidad de datos generados durante el proceso de detección es considerable y requiere algoritmos de procesamiento especializados para extraer información útil. Sin embargo, los algoritmos actuales son incapaces de procesar todos los datos que generan los sensores en tiempo real. Es necesario diseñar algoritmos que extraigan toda la información útil en tiempo real para producir alertas, así como para generar tendencias y predicciones. Los algoritmos de inteligencia artificial mejoran el rendimiento del procesamiento de los datos para generar alertas y diagnósticos de enfermedades en tiempo real. Sin embargo, un reto importante que se identifica en las técnicas de procesamiento es el de extraer toda la información útil que contiene un conjunto de datos. Por lo tanto, se necesitan algoritmos de procesamiento de datos eficientes que puedan identificar múltiples características y combinar las características redundantes en un conjunto de datos durante el tiempo de ejecución.

Sincronización temporal

La sincronización del tiempo es una de las tareas más complejas y esenciales de la infraestructura del IoT. Es imprescindible porque, en el ámbito sanitario, cada segundo es muy crucial. Es compleja porque la colección de dispositivos o sensores del IoT es muy heterogénea y, por ende, su tasa de generación de datos también lo es. Por ejemplo, un sensor que mide la temperatura corporal del paciente puede generar un registro cada minuto, mientras que en el mismo marco temporal un sensor de electrocardiografía habrá generado cientos de muestras. Además, las medidas se realizan en momento distintos, lo que dificulta su uso en los modelos de visualización y análisis de datos. Debido al gran volumen de datos en tiempo real generados por los diferentes sensores en la infraestructura IoT, la sincronización de tiempo se ha convertido en una necesidad. Tener mecanismos eficientes de sincronización ayudará a crear aplicaciones sanitarias más precisas, lo cual a su vez facilitará realizar análisis en tiempo real y a dar soluciones a través de Internet a diversos pacientes.

Herramientas de verificación y validación

El ámbito de la sanidad inteligente también se enfrenta a varios retos relacionados con la escasez de herramientas de verificación y validación. Si bien existen algunas herramientas eficientes de simulación de dominios específicos, la mayoría no son aptas para la compleja infraestructura del IoMT. Por lo tanto, resulta necesario desarrollar nuevas herramientas prácticas que puedan lidiar con el entramado de sensores de la infraestructura sanitaria inteligente, y que ayuden a construir sistemas sanitarios inteligentes basados en el IoMT.

Privacidad y seguridad

La privacidad y seguridad son cuestiones críticas y complejas que hay que tener en cuenta adecuadamente al construir un sistema IoMT. Se trata de un aspecto importante porque los datos de los pacientes deben estar debidamente protegidos y mantenerse privados. Por ejemplo, los historiales médicos de los pacientes no deben salir del sistema, pero sí ser accesibles para el paciente y los especialistas sanitarios facultados. Por tanto, son necesarios dos tipos de mecanismos de seguridad: el primero en el extremo del médico y el segundo en el canal de comunicación de datos. A la hora de diseñar sistemas IoMT se debe tener siempre presente que la falta de privacidad puede causar graves daños a los pacientes y supone una violación de las políticas éticas y la normativa legal vigente.

Asegurar los datos médicos y garantizar la privacidad de los usuarios es excepcionalmente esencial para la adopción generalizada de los sistemas IoMT. El uso de nuevas tecnologías puede mejorar las características de seguridad, pero las diferentes tecnologías solo pueden utilizarse eficazmente en capas específicas de la arquitectura IoMT. La naturaleza de los sistemas IoMT, con sus recursos limitados, exige el desarrollo de algoritmos ligeros para contrarrestar las amenazas a la seguridad de los datos y preservar la privacidad de los usuarios mientras se comparten los datos en la red. Además, para proporcionar una seguridad adecuada en la infraestructura IoMT, es necesario actualizar cada cierto tiempo el protocolo de seguridad, y por consiguiente, el software que controla los sistemas IoMT. Esta es una tarea desafiante, en tanto en cuanto que construir un modelo de actualización de seguridad dinámico que sea adecuado para la instalación de parches de seguridad de forma dinámica cumpliendo con los requisitos de seguridad exige diseños sofisticados y avanzados capaces de permitir dichos cambios sin afectar el funcionamiento normal de los sistemas.

Falta de norma

Construir cualquier sistema nuevo es siempre una tarea difícil y complicada. Dicha tarea se complica cuando se carece de una norma o estándar concreto que defina los aspectos a garantizar para el establecimiento de un sistema adecuado y eficiente. Por ejemplo, como se ha visto anteriormente, en el ámbito de la sanidad, la privacidad, la seguridad y las medidas de protección son cruciales y deben tratarse adecuadamente. La gestión de estos aspectos es posible mediante el uso de varios estándares. En el contexto del ámbito de la asistencia sanitaria inteligente los datos se intercambian entre el médico y el paciente y se incorporan con múltiples niveles de seguridad en ambos lados. La cuestión no obstante es cómo decidir en qué nivel se viola la política de privacidad o confidencialidad

de los datos. Por lo tanto, se necesita una estandarización que pueda abordar eficazmente este tipo de situaciones.

Políticas regulatorias

Hay muchas leyes en vigor que protegen a los usuarios de diferentes servicios contra el abuso de confianza y la protección contra los posibles peligros asociados al uso de los sistemas inteligentes en salud. Para la adopción de la IoMT, debería haber directrices claras para la protección de los datos y la privacidad de los usuarios. Por ejemplo, debe haber salvaguardas contra la exposición a las radiaciones electromagnéticas que conectan los sensores a la red. Es necesaria una legislación de este tipo y la elaboración de políticas que guíen el despliegue a gran escala de los sistemas IoMT. Para poder hacer frente a este tipo de reto resulta necesaria una estrecha colaboración entre la comunidad investigadora y los órganos legislativos.

3. Futuro

Tal y como se ha constatado en unidades anteriores de este módulo, el impacto del IoT en el avance de la industria sanitaria es muy destacado. La llegada de la medicina digital ha dado lugar a un mayor esfuerzo para desarrollar plataformas, tanto a nivel hardware como software. Esta visión ha conducido al desarrollo de los sistemas IoMT, los cuales incluyen tecnologías de comunicación entre los nodos de detección y los procesadores, y los algoritmos de procesamiento para generar una salida a partir de los datos recogidos por los sensores. Sin embargo, en la actualidad, estas tecnologías habilitadoras se apoyan también en varias tecnologías nuevas. Así, por ejemplo, el uso de la inteligencia artificial va a transformar los sistemas IoMT en casi todos los niveles, como sucede prácticamente con cualquier otro ámbito tecnológico a día de hoy. De forma más específica para el IoMT, el paradigma de computación en la niebla (fog) y el borde (edge) va a acercar la potencia de cálculo a la red desplegada y, por tanto, tratar de mitigar algunos de los retos descritos en la sección anterior. Las redes definidas por software (SDN) aportarán flexibilidad al sistema, mientras que las cadenas de bloques (blockchain) plantean nuevos casos de uso en los sistemas IoMT, especialmente en lo concerniente a aspectos de seguridad e integridad de los datos. Conceptos más novedosos si cabe como el internet de las nano cosas (IoNT) y el internet táctil (TI) completan el diverso conjunto de nuevas tecnologías que impulsarán la innovación en el corto y medio plazo de las aplicaciones IoMT. A continuación, se describen en más detalle las principales características de estas tecnologías y su rol en el IoMT.

Arquitecturas híbridas avanzadas

La computación en el borde o frontera es un paradigma de computación distribuida que acerca computación y almacenamiento de datos a la ubicación en la que se necesita para mejorar los tiempos de respuesta y ahorrar ancho de banda en el IoT. La computación en la nube presenta una arquitectura horizontal útil para distribuir sin problemas recursos y servicios informáticos, almacenamiento de datos, control y funcionalidad de red en la infraestructura que conecta la nube al

IoT. Por tanto, la principal ventaja de las arquitecturas que combinan computación en la niebla y el borde es la capacidad de reducir la latencia y permitir una mayor capacidad computacional con recursos limitados. Gracias a estas características, este tipo de arquitecturas permite dar soporte a las aplicaciones que requieren una gran potencia de cálculo y un bajo retardo, lo cual resulta de especial interés en el IoMT (Figura 17).

Una de las características más importantes de las aplicaciones y servicios del IoMT es la baja latencia. Para cumplir este requisito, el tiempo de transmisión entre los nodos (sensores) y el sumidero (unidad de procesamiento) tiene que reducirse todo lo posible. Esto puede lograrse acortando la distancia entre los nodos y el sumidero o acelerando la transmisión. La computación en el borde permite hacer ambas cosas. Este tipo de arquitectura proporciona potencia de cálculo localmente en la red, lo cual es esencial ya que los nodos IoMT son por lo general de baja potencia en términos de energía y recursos computacionales. Así, el tiempo de transmisión entre los dispositivos de borde y las unidades de procesamiento se reduce significativamente, ya que la unidad de procesamiento se convierte en parte de la red. Los datos se (pre)procesan en el borde en el borde, por ejemplo, en el teléfono inteligente del usuario, y luego se descargan en la unidad de procesamiento remota, por ejemplo, un servidor remoto. En ambos casos, el rendimiento de la red en términos de latencia mejora considerablemente. Además, la computación de borde ayuda a proporcionar interoperabilidad entre múltiples dispositivos al aislar los dispositivos de borde de la red o nodo central.

Los sistemas de niebla y de borde también proporcionan una plataforma para asegurar los datos recogidos por los sensores. Las capacidades informáticas introducidas cerca de los dispositivos pueden ayudar a asegurar los datos generados por el usuario a partir de las capas más bajas del IoT. La seguridad de los datos mediante la adopción de un sistema distribuido en lugar de un sistema centralizado se consigue mediante el uso del paradigma de la niebla. Esta estrategia es especialmente útil para mitigar los ataques de denegación de servicio distribuidos, como los causados por botnets, los cuáles son una amenaza crítica para un sistema IoMT. Asegurar los dispositivos sensores permite actuar como la primera línea de defensa contra las amenazas de seguridad, ya que el acceso al sensor permite a un atacante muchas posibilidades de explotar el sistema y amenazar la seguridad de los datos críticos del usuario. Otra opción es encriptar los datos de monitorización antes de su transmisión a la nube. Esta capa de seguridad añadida puede implementarse utilizando también el nodo de borde.



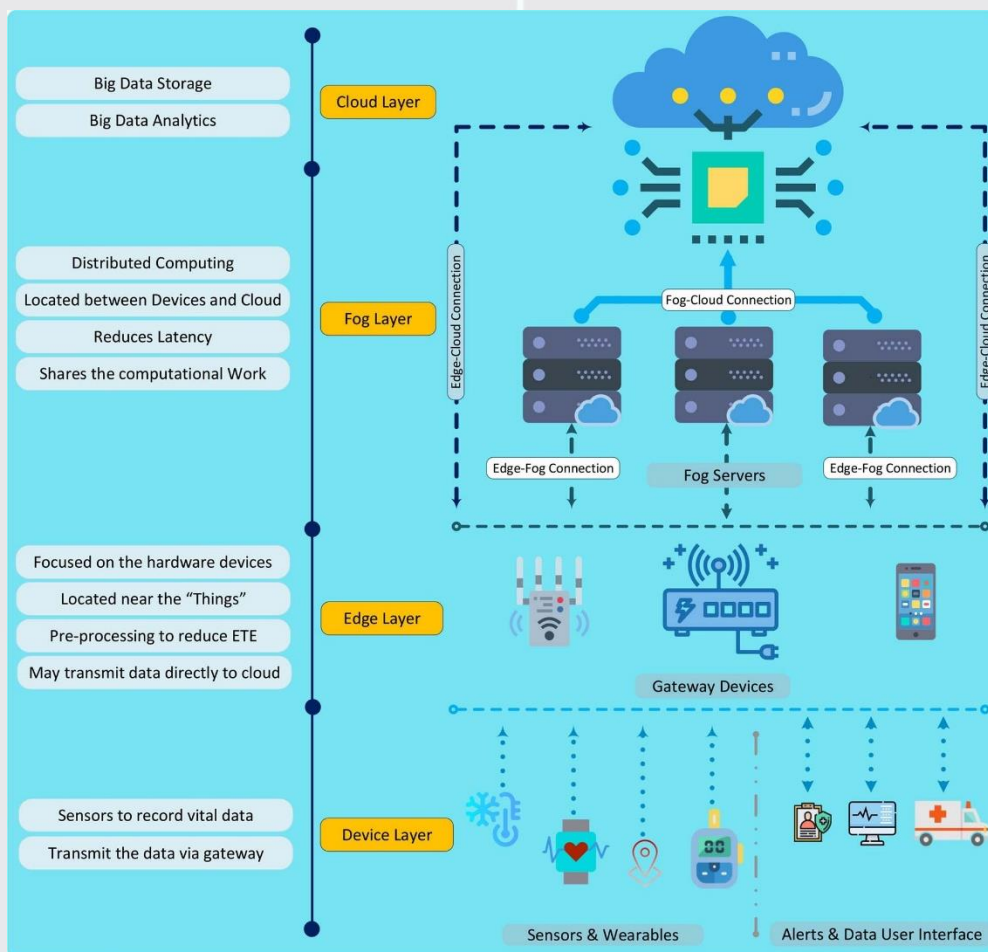


Figura 17: Arquitectura híbrida avanzada basada en computación nube (fog) y borde (edge). (Fuente: (Qadri, 2020))

Blockchain

Las cadenas de bloques o blockchain constituyen una estructura de datos cuya información se agrupa en bloques a los que se les añade información extra relativa a otro bloque de la cadena anterior en una línea temporal. De esta forma, gracias al uso de técnicas criptográficas, la información contenida en un bloque solo puede ser repudiada o editada modificando todos los bloques posteriores. Esta propiedad permite su aplicación en un entorno distribuido de manera que la estructura de datos blockchain puede ejercer de base de datos pública que contenga un histórico irrefutable de información, impidiendo que los datos puedan ser hackeados.

Las aplicaciones de las cadenas de bloques (blockchain) ya no se limitan a las criptomonedas, sino que se pueden encontrar en muchos nuevos escenarios de aplicación. Uno de estos nuevos ámbitos de aplicación es precisamente el sanitario. En el contexto del IoMT, las cadenas de bloques pueden aportar soluciones a muchos retos críticos. Las ventajas de la blockchain en la IoMT incluyen, entre otras, el compartir de forma segura los datos de los pacientes entre plataformas, mejorar la interoperabilidad de los datos y eliminar la necesidad de terceros para el control de acceso. De este

modo se crea un sistema eficiente, transparente, rápido y seguro. Blockchain permitirá contribuir a asegurar los sistemas IoMT proporcionando un sistema transparente de almacenamiento de datos y aprovechando los contratos inteligentes, esto es, programas informáticos que facilitan, aseguran, hacen cumplir y ejecutan acuerdos registrados entre dos o más partes, para dar soporte directo en las transacciones realizadas en los servicios de salud digital. El uso de contratos inteligentes puede garantizar que los servicios ofrecidos por los proveedores de servicios sean asimismo compensados de forma segura y justa.

Red definida por software (SDN)

Las redes definidas por software o software defined networks (SDN) están teniendo un gran impacto en la gestión de redes, especialmente en los sistemas del IoT. Tienen como objetivo el facilitar la implementación e implantación de servicios de red de una manera determinista, dinámica y escalable, evitando al administrador de red gestionar dichos servicios a bajo nivel. La implementación de las SDN está haciendo que el IoMT pase de ser un sistema de aplicación específica a un ecosistema más programable. Las SDN desacoplan esencialmente el plano de control y de datos de la red. Este desacoplamiento permite la configuración y gestión dinámica y flexible de las reglas de reenvío de datos en la red, lo cual se consigue mediante la virtualización de las funciones de los dispositivos de red para adaptarse a los requisitos de la red en tiempo real. Por lo tanto, se consigue una utilización más eficiente de la energía, una mejor asignación y gestión de los recursos y una mayor seguridad y privacidad.

El tremendo aumento del tamaño y la diversidad de la red crea heterogeneidad en la misma y genera datos masivos que requieren análisis, extracción de características, y procesamiento. La arquitectura actual del IoMT es incapaz de ofrecer flexibilidad, reconfiguración e interoperabilidad. Para abordar estas limitaciones de la red IoT, la SDN ofrece gestión, virtualización y accesibilidad de red, además de utilización de recursos, gestión de energía, y, seguridad y privacidad separando el control de la red de los dispositivos de hardware. Como se ha mencionado antes, la principal funcionalidad de la SDN es aislar el plano de control del plano de datos de la red para agilizar el rendimiento de la misma. Este dispositivo de red actúa únicamente como un dispositivo de reenvío, que reenvía una secuencia de paquetes desde el origen hasta el destino regulando los flujos bajo diversas políticas. El plano de control en la SDN es una unidad centralizada, mientras que el plano de datos funciona de forma distribuida. Las SDN se apoyan sobre la arquitectura de la red de gestión de telecomunicaciones. Esta consta de tres planos: el plano de gestión, el plano de datos y el plano de control. El plano de gestión constituye la unidad de mantenimiento y operaciones de la red, es decir, los operadores humanos y el software que supervisa el estado de la red, y la configura y la actualiza. El plano de datos realiza la transmisión de datos siguiendo una tabla de flujo. Los routers, conmutadores, cortafuegos y circuitos están equipados con una tabla de flujo para transmitir los datos. El plano de control se encuentra en el controlador centralizado para configurar la red de acuerdo con los requisitos de la aplicación, por ejemplo, la ruta de la red, los protocolos de enrutamiento, las políticas de la red. Estos requisitos son especificados por el plano de aplicación.

IoT de las nanocosas (IoNT)

mooc

Internet de las cosas

IOT

Los avances en la miniaturización de los sistemas electrónicos durante los últimos años están conduciendo a un aumento exponencial de la gama de nodos sensores disponibles para monitorizar diversos parámetros vitales del cuerpo humano. Este tipo de sistemas, frecuentemente denominados como nanocosas, han experimentado un crecimiento explosivo en el mercado y, como consecuencia, están dejando un enorme impacto en diversos ámbitos, como la exploración petrolera, la monitorización y el descubrimiento de aguas subterráneas, la evaluación de daños en estructuras y hormigón, la agricultura, las ciudades inteligentes, la monitorización de procesos industriales, la monitorización de la vida salvaje y la comunicación de alta velocidad. En el contexto de la salud, existen cada vez más dispositivos diminutos inteligentes vestibles e implantables, haciendo necesario desarrollar nuevas infraestructuras especiales para proporcionar apoyo a las nanocosas, el denominado, internet de las nanocosas (IoNT).

La comprensión básica del IoNT desde la perspectiva de la IoMT puede entenderse mejor a partir de las funciones de las nanocosas. Las nanocosas, habilitadas por los sistemas nanoelectrónicos y las técnicas de fabricación de precisión, son los dispositivos de detección y actuación. Estos se despliegan en los órganos o en el torrente sanguíneo y se comunican a través de una de las múltiples tecnologías de comunicación que permiten la nanocomunicación para transmitir la información detectada y/o la actuación controlada. Las aplicaciones de las IoNT son inmensas, y van desde la administración de fármacos de precisión, donde nanorobots proveen fármacos a órganos específicos con una precisión milimétrica lo que se traduce en un tratamiento más eficaz y la reducción de los efectos secundarios, el diagnóstico de precisión y los microprocedimientos en los órganos inaccesibles del cuerpo.

No obstante, existen múltiples retos que dificultan el desarrollo de la IoNT y, por extensión, de la IoMT para la salud. En primer lugar, existen inmensas limitaciones energéticas debido al diminuto tamaño de las nanocosas. La autogeneración o recolección de energía, por ejemplo, a partir del calor humano o la electricidad corporal, puede ser una solución prometedora para una red IoNT con limitaciones de energía. Existen asimismo problemas de diseño que deben abordarse con respecto a la estructura de la antena, de nuevo tanto por cuestiones de tamaño como por robustez a las interferencias de la señal dentro del cuerpo. Otros problemas destacados corresponden, a desafíos para los protocolos interoperables para la comunicación y el intercambio de datos, problemas de seguridad y mantenimiento de la privacidad, y dificultades en el despliegue operativo de la red de nanocosas.

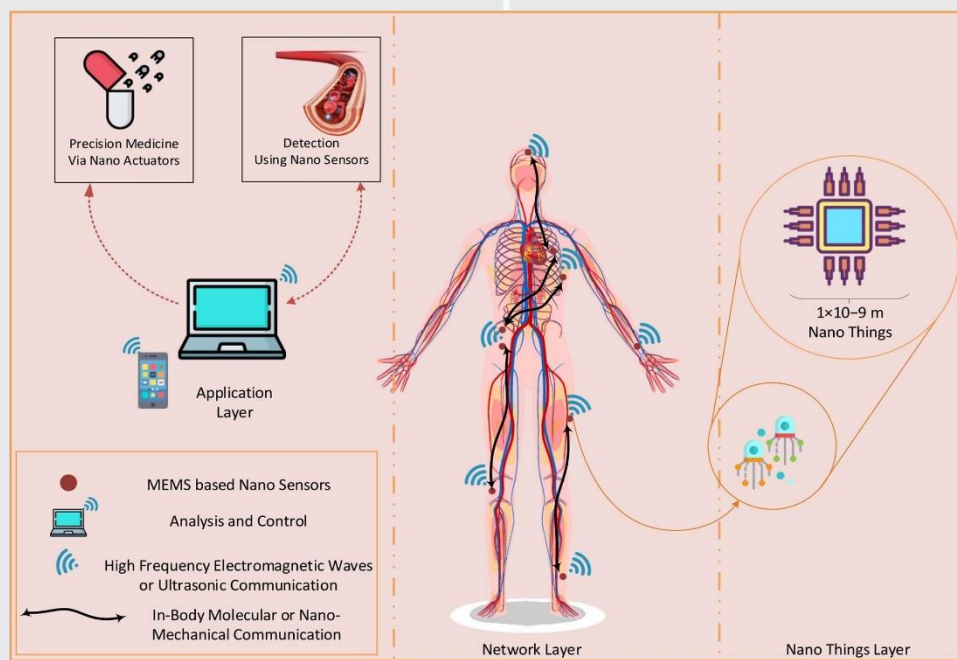


Figura 18: Arquitectura del Internet de las Nanocosas Médicas. (Fuente: (Qadri, 2020))

Internet táctil

El internet táctil está referido a una nueva visión de la conectividad sensorial a través de Internet. El concepto fue acuñado hacia 2014 pero surge con una iniciativa del IEEE en 2015 para estandarizar la comunicación entre dispositivos que tratan de reproducir los sentidos y los estímulos de cara a permitir la percepción en el mundo digital (Maier, 2016). El internet táctil se basa en la interacción física remota también definidos como háptica. El término háptico se refiere a su vez a la percepción cinestésica y la percepción táctil. La percepción cinestésica se refiere a los datos que representan el movimiento del cuerpo, definido fundamentalmente por orientación, velocidad y posición. La percepción táctil es la información que define la percepción del tacto, como la textura de la superficie, la fricción, etc. Esta interacción háptica entre las cosas y los humanos solo puede ser eficaz si la comunicación entre los nodos es ultrarrápida y altamente fiable. La percepción cinestésica sigue una comunicación de bucle cerrado; por lo tanto, requiere una comunicación de retardo cero. En cambio, la percepción táctil es un sistema de bucle abierto, por lo que las limitaciones de tiempo no son tan estrictas. El internet táctil está habilitada por la comunicación háptica, que permite transmitir la percepción de tacto y actuación en tiempo real. Por lo tanto, hay un conjunto de limitaciones estrictas de latencia en la comunicación en el internet táctil, definiendo el estándar un retardo de ida y vuelta máximo de 1 milisegundo.

El papel del internet táctil en la sanidad es especialmente importante. Algunas de las aplicaciones potenciales de esta tecnología en el IoMT son: prótesis locomotoras y sensoriales (detectan el entorno y lo traducen en impulsos eléctricos percibidos en la piel, por ejemplo en el caso de personas que sufren discapacidades visuales o auditivas), rehabilitación (los sensores/actuadores pueden

ayudar a percibir sensaciones perdidas, por ejemplo en el caso de parálisis motoras), cirugía a distancia (permite percibir al especialista las sensaciones hápticas que tendría con el material quirúrgico durante un procedimiento presencial) o formación médica interactiva (en combinación con tecnologías de realidad aumentada o virtual, la realimentación háptica permite mejorar los procesos pedagógicos así como definir escenarios críticos difícilmente replicables en un contexto real).

4. Bibliografía

Ma, S. K. (2018). Implantable sensors and antennas for wireless brain care. *URSI Atlantic Radio Sci. Meeting*, (págs. 1-2). Meloneras.

Maier, M. C. (2016). The tactile Internet: Vision, recent progress, and open challenges. *IEEE Commun. Mag*, 138-145.

Qadri, Y. A. (2020). The future of healthcare internet of things: a survey of emerging technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 1121-1167.

She, D. T. (2019). Biodegradable batteries with immobilized electrolyte for transient MEMS. *Biomedical Microdevices*, 17.

Zikria, Y. B. (2019). Internet of Things (IoT) operating systems management: Opportunities, challenges, and solutions. *Sensors*, 1793.