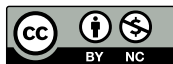


Revisión sistemática de literatura sobre mecanismos de recolección de energía utilizados en dispositivos de monitorización de signos vitales

Systematic Literature Review on Energy Harvesting Mechanisms Used in Vital Signs Monitoring

Nataly Peñafiel-Arteaga¹ <https://orcid.org/0009-0000-7562-3761>,
Marlon Navia¹ <https://orcid.org/0000-0001-9775-3778>

¹Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador
npenafiel8157@utm.edu.ec, marlon.navia@utm.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Enviado: 2024/07/26
Aceptado: 2025/04/08
Publicado: 2025/06/30

Resumen

Los dispositivos de monitorización de signos vitales desempeñan un papel importante en el ámbito médico al permitir el seguimiento continuo de los pacientes. No obstante, estos equipos actualmente dependen de baterías o suministro eléctrico para su funcionamiento, pudiendo presentar limitaciones e inconvenientes como la pérdida de datos y la interrupción de la vigilancia constante. A pesar de ello, la creciente implementación de mecanismos autónomos de recolección de energía podría reemplazar los métodos convencionales de alimentación. Esta revisión sistemática de literatura se llevó a cabo con el objetivo de identificar los mecanismos de captación de energía más apropiados para dispositivos de seguimiento de constantes vitales en seres vivos. El análisis incluyó tanto fuentes ambientales como aquellas producidas por el cuerpo humano. Se proporcionó también información sobre los signos vitales más comúnmente monitorizados, así como la ubicación del dispositivo en el cuerpo. También se especificó la producción energética generada por las tecnologías consideradas en las publicaciones analizadas. Los mecanismos más utilizados fueron el triboeléctrico y piezoeléctrico, mientras que la radiofrecuencia y triboeléctrico obtuvieron una mayor producción energética. Cabe recalcar que los mecanismos evaluados son aplicables tanto en personas como otros seres vivos pues se comparten ciertas similitudes con los animales domésticos.

Sumario: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión, Conclusiones.

Como citar: Peñafiel-Arteaga, N. & Navia, M. (2025). Revisión sistemática de literatura sobre mecanismos de recolección de energía utilizados en dispositivos de monitorización de signos vitales. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(1), 247-263. <https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/1224>

Palabras clave: Recolección de energía, dispositivos inalámbricos, triboeléctrico, piezoeléctrico, radiofrecuencia.

Abstract

Vital signs monitoring devices play a crucial role in the medical field by enabling continuous patient tracking. However, these devices rely on batteries or an electrical power supply, which can present limitations and inconveniences such as data loss and interruptions in continuous monitoring. Nevertheless, the increasing implementation of autonomous energy harvesting mechanisms may replace conventional power sources. This systematic literature review was conducted to identify the most appropriate energy harvesting mechanisms for vital signs monitoring devices in living organisms. The analysis included both environmental sources and those generated by the human body. Information was also provided on the most commonly monitored vital signs and the device's location on the body. Additionally, the energy output generated by the technologies considered in the analyzed publications was specified. The most used mechanisms were triboelectric and piezoelectric, while radiofrequency and triboelectric methods achieved higher energy production. It is worth noting that the evaluated mechanisms apply to both humans and other living beings, as they share certain similarities with domestic animals.

Keywords: Energy harvesting, wireless devices, triboelectric, piezoelectric, radiofrequency.

Introducción

La automatización de dispositivos impulsada por los avances tecnológicos continuos ha significado una notable mejora en eficiencia y agilidad en diversos procesos de productividad en innumerables ámbitos. A pesar de estos progresos, persiste un problema importante en el campo de la energía. Los aparatos electrónicos, ya sea aquellos conectados a la corriente eléctrica como los que siguen dependiendo de baterías, siguen enfrentándose a importantes retos relacionados con su alimentación, ya que aún se encuentran en proceso de mejora.

El incremento en la vida útil de las baterías, con modelos que actualmente pueden durar hasta 7 años, demuestra logros significativos, aunque el tiempo de funcionamiento todavía depende de la capacidad energética que consumen los sistemas (Blažević et al., 2022). Sin embargo, el uso constante de baterías presenta problemas de sostenibilidad debido a los componentes corrosivos que impactan negativamente al medio ambiente; además, esta situación afecta la eficiencia de dispositivos que manejan aplicaciones críticas, especialmente en el campo médico como el monitoreo de la salud.

Por tanto, el seguimiento de la salud mediante dispositivos electrónicos es fundamental para la gestión de la atención médica. No obstante, el cambio periódico de las baterías produce la pérdida temporal del control, comprometiendo la continuidad, eficiencia del monitoreo y las mediciones durante el lapso requerido para el reemplazo, perjudicando, particularmente, la supervisión de la salud en áreas de difícil acceso (Pozo et al., 2018).

Los dispositivos que monitorean los signos vitales representan una línea significativa entre el estado del paciente y la atención médica inmediata, ya que se pueden obtener datos al monitorear la temperatura corporal, presión arterial, saturación de oxígeno y otros parámetros médicos. De esta manera las alertas generadas por los dispositivos inalámbricos ante cambios en la condición de los pacientes pueden reflejarse en aplicaciones de monitorización, convirtiendo la información obtenida en un recurso valioso para la prevención de enfermedades

(Hezekiah et al., 2023). Sin embargo, es necesario priorizar que la tecnología aplicada en la persona no interfiera en sus actividades diarias (Manzano & Bejarano, 2021).

Ahora, imaginar un sistema de seguimiento de salud que nunca requiera una batería para mantener una vigilancia permanente e ininterrumpida sobre los pacientes, podría ser posible a través de la recolección de energía ambiental. Esta tecnología revolucionará la atención médica inmediata y remota.

Por tal motivo, propuestas innovadoras y autónomas como la recolección de energía o “Energy Harvesting” (EH, por sus siglas en inglés), surgen para abordar los desafíos de sostenibilidad y eficiencia en el monitoreo de salud. Este enfoque no solo reduce la dependencia de las baterías, sino que también promueve la conservación del medio ambiente al captar energía disponible del entorno o del cuerpo y convertirla en energía eléctrica, misma que sería utilizada como fuente de alimentación para dispositivos inalámbricos de bajo consumo. Es importante conocer la cantidad de energía consumida por el circuito para garantizar que la energía acumulada y almacenada sea superior (Shuvo et al., 2022; Isiyoto et al., 2022)

Además, se visualiza que EH desempeñará un papel fundamental en los sistemas de IoT en la era 5G, debido a su facilidad de autoalimentación al experimentar deficiencia energética. Es por esto que se ha incrementado la necesidad de estudiar y desarrollar la implementación de recolección de energía en dispositivos portátiles (Heidari et al., 2021).

En el presente trabajo se llevará a cabo una revisión sistemática de literatura sobre estudios relevantes de “Energy Harvesting” aplicados a dispositivos de monitorización de signos vitales utilizando información de diferentes bases de datos científicas. La finalidad es comprender los disímiles tipos de fuentes energéticas utilizadas en la recolección de energía e identificar las propuestas que mayormente son aplicadas en dispositivos de monitorización de signos vitales en seres vivos. El aporte principal de este trabajo es un análisis actualizado de los mecanismos de EH aplicados en este ámbito, pero además se ha considerado la monitorización en cualquier ser vivo, ya que la mayoría de revisiones se basan exclusivamente en seres humanos.

La estructura de este artículo implica varias secciones. Se da inicio con la descripción de antecedentes relevantes acerca de los mecanismos de recolección de energía y sus aplicaciones en diversas áreas; a continuación, se desarrolla el apartado de métodos y herramientas, donde se detalla la metodología y recursos aplicados en el proceso investigativo; posteriormente, se presentan los resultados obtenidos y una breve discusión; en la última sección se exponen las conclusiones del trabajo.

Estado del arte

La monitorización de signos vitales es un aspecto primordial en la atención médica, ya que provee información crucial para el seguimiento y tratamiento de pacientes, que incluso influye en el diagnóstico de posibles enfermedades.

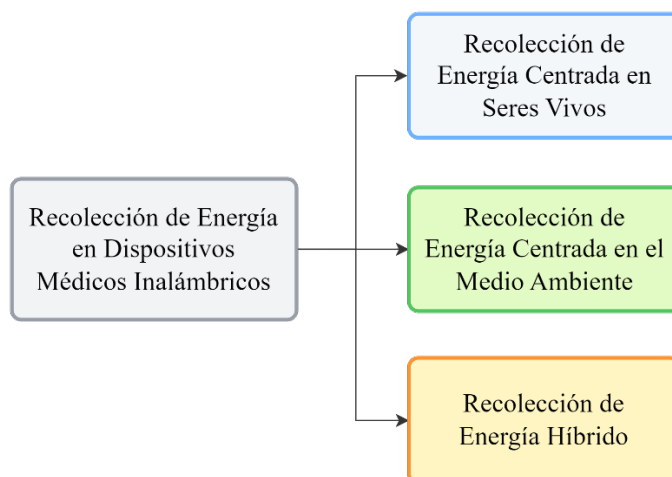
Por dichas razones, crear dispositivos portátiles de bajo costo, precisos y fáciles de usar se intensifica, y el desarrollo de brazaletes para la monitorización de signos vitales parece ser una opción viable. Hadiyoso et al. (2021) demuestran que estos dispositivos podrían realizar lecturas de presión arterial, frecuencia cardíaca, saturación de oxígeno, hasta electrocardiogramas. En su propuesta presentan en la pantalla del brazalete los datos recopilados y para facilitar el seguimiento inalámbrico emplean un módulo Bluetooth.

Siguiendo la idea de reemplazar las baterías para el funcionamiento de dispositivos autónomos, han surgido diversos estudios y progresivamente se explora sobre la recolección de energía y sus métodos para aplicarlos en dispositivos portátiles inalámbricos, tal como concluye la investigación presentada por Ali et al. (2023)

En cuanto al área médica, se disponen de diversos estudios con estas técnicas aplicadas en dispositivos de monitorización de signos vitales. Varios autores dan a conocer diferentes implantes y dispositivos médicos que emplean EH para su operatividad, a pesar que no indican el mecanismo de recolección de energía predominante en el ámbito médico, respecto al monitoreo de signos vitales (Shuvo et al., 2022b); adicionalmente, el trabajo citado proporciona una clasificación de métodos de recolección de energía en dispositivos médicos, ya sean implantables o inalámbricos. La Figura 1 es una adaptación representativa de dicho esquema, pero enfocada con el tema de estudio propuesto.

Figura 1

Adaptación de clasificación de técnicas de EH en dispositivos médicos implantables y portátiles



En relación con la Figura 1, el trabajo realizado por Mahmood et al. (2023), con el tema de recolección de energía basada en aplicaciones biomédicas, es una revisión que indica técnicas de captación energética provenientes de fuentes medioambientales y del cuerpo humano. Su propósito es aplicarla en dispositivos que podrían ser usados tanto en entornos interiores como exteriores; además, define los mecanismos de la siguiente manera:

- **Triboeléctrica:** la electricidad se obtiene a partir del efecto triboeléctrico. Los materiales se cargan eléctricamente a través de la fricción. Se colocan electrodos en cada material, y el efecto de electrificación se combina con la inducción electrostática para obtener energía reutilizable. Para la recolección de energía en dispositivos portátiles se utilizan principalmente nanogeneradores triboeléctricos.
- **Fotovoltaica:** este tipo de energía se basa en la conversión de la luz solar en electricidad mediante células solares que funcionan con materiales semiconductores, generando un flujo de electrones.
- **Termodinámica:** se aprovecha la diferencia de temperatura entre dos cuerpos para generar electricidad. Puede ocurrir de forma natural, a partir del calor corporal humano que proporciona una cantidad adecuada de energía para alimentar sensores implantados, o de otra manera, utilizando generadores termoeléctricos fabricados con metales o polímeros.

- Piezoeléctrico: adquiere energía de los movimientos mecánicos como vibraciones o impactos. Los materiales piezoeléctricos pueden convertir la energía mecánica directamente en electricidad sin necesidad de un proceso intermedio. Al experimentar tensión mecánica se genera un campo eléctrico, y la energía captada se usa para alimentar dispositivos de bajo consumo.
- Eólica: es obtenida a partir del viento, que es la fuente de energía renovable. Se utilizan aerogeneradores, dispositivos con aspas que giran por la misma acción del viento, transformando la energía cinética en electricidad. Las turbinas eólicas son de distintos tamaños y formas según la potencia requerida.
- Radiofrecuencia: recolecta ondas electromagnéticas emitidas por antenas de radio u otros medios y luego las convierte en energía, mediante circuitos rectificadores y antenas especializadas para alimentar dispositivos. Estas ondas pueden penetrar tejidos blandos, siendo factibles utilizarlas en dispositivos médicos.

A continuación, se describen ejemplos de dispositivos de monitorización de signos vitales que implementan EH:

En un estudio se utilizó un nanogenerador piezoeléctrico que recolectó energía a partir de la respiración y los latidos del corazón de una rata, lo que permitió medir la frecuencia respiratoria (Li et al., 2010); asimismo, en otro trabajo, se diseñó un sistema para recolectar energía de los latidos cardíacos porcinos, debido a su anatomía similar a la de los seres humanos, y se obtuvo información de la frecuencia cardíaca (Kim et al., 2017); también se investigó la relación de la frecuencia cardíaca y la generación de energía a través del balanceo de los brazos al aplicar películas especializadas (Z. Lin et al., 2017).

En otro enfoque, diversos autores desarrollaron un sistema portátil sin batería que mide las frecuencias respiratoria y cardíaca, y el movimiento del torso de una persona. En el sistema incorporaron un panel solar flexible que alimenta la placa del circuito en una camisa para facilitar las actividades de la persona. Comparaciones entre las mediciones obtenidas por el circuito y los instrumentos médicos convencionales corroboraron la confiabilidad de los datos (Dionisi et al., 2016).

Los investigadores Isioto et al. (2022) consideran al cuerpo humano como fuente de energía que suministra alimentación energética a sistemas independientes. La recolección de energía se lleva a cabo durante las actividades cotidianas que se realizan, como el movimiento generado por los brazos, las pisadas u otras acciones; no obstante, cuando el movimiento es originado por la respiración y los latidos del corazón, se requiere el uso de películas especializadas para captar la energía (W. Lin et al., 2023).

La importancia de la recolección de energía en contextos de monitoreo relacionados con aspectos de los seres vivos ha sido y seguirá siendo objeto de investigación en constante desarrollo.

Materiales y Métodos

En esta investigación se aplicó la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis*) (Page et al., 2021). Se emplearon las tres fases de PRISMA propuestas por los autores Kitchenham & Charters (2007) para la ejecución de una revisión sistemática de literatura (*System Literature Review*, SLR):

- Fase 1 Planificación: se enfocó en el planteamiento de las preguntas de investigación que se abordaron en la investigación y también en el desarrollo del protocolo que se llevó a cabo.
- Fase 2 Ejecución de la revisión: se identificaron y seleccionaron los estudios rigurosamente. Luego se evaluó la calidad, extrayendo los datos pertinentes de los documentos aceptados.
- Fase 3 Informe de la revisión: se especificaron los resultados obtenidos a lo largo del proceso investigativo en un documento detallado.

Preguntas de investigación

La pregunta de investigación principal (*Research Question*, RQ) que surge para guiar este estudio fue la siguiente: ¿De qué forma se pueden determinar los mecanismos de recolección de energía más utilizados en dispositivos de monitorización de signos vitales en seres vivos?

El objetivo de esta SLR fue proporcionar una respuesta a la pregunta propuesta, centrándose en identificar y analizar las técnicas de *energy harvesting* que han generado mayor impacto en los últimos años en los dispositivos de monitoreo de signos vitales en seres vivos.

Cabe recalcar que la evaluación de los estudios se realizó en inglés, considerando que la comunidad científica lo utiliza como idioma estándar y, por lo tanto, existe una mayor gama de recursos actualizados y de calidad.

A su vez, se definieron los términos clave en este idioma, los que fueron asignados apropiadamente en los criterios de PICOC (población, intervención, comparación, resultados y contexto) para estructurar las preguntas investigativas que ayudaron con la respuesta de la interrogante principal. Las palabras clave establecidas para este propósito fueron:

- Población (P): *energy harvesting*, *energy scavenging*, *power harvesting*.
- Intervención (I): *monitor*, *monitoring*, *device*, *system*.
- Contexto (C): *vital signs*, *vitals*.

Los términos de comparación (C) y resultados (O) no se incluyeron, ya que no es pertinente comparar mecanismos de recolección de energía específicos, ni definir resultados previamente establecidos.

Las preguntas de investigación generadas como apoyo fueron las siguientes:

- RQ1: ¿Qué mecanismos de EH se utilizan en dispositivos de monitorización de signos vitales?
- RQ2: ¿Qué signos vitales se monitorizan con los dispositivos?
- RQ3: ¿Cuál es la producción energética de los distintos mecanismos de recolección de energía en cada caso?
- RQ4: ¿En qué parte del cuerpo se ubica el dispositivo de monitorización de signos vitales?

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

Las fuentes seleccionadas en esta investigación incluyeron Scopus, IEEE Xplore, ACM Digital Library, ScienceDirect y SpringerLink. Se consideraron varios requisitos para la selección de estas bases de datos científicas como: la relevancia que tienen en el ámbito

investigativo y el área de estudio, la posibilidad de utilizar búsqueda avanzada y que la integridad de la cadena de búsqueda en las diversas fuentes científicas se mantuviera.

Como parte de la estrategia de búsqueda, se emplearon las palabras claves de PICOC en conjunto con los operadores booleanos como AND y OR para establecer la siguiente cadena de búsqueda:

("energy harvesting" OR "energy scavenging" OR "power harvesting") AND ("device" OR "monitor" OR "monitoring" OR "system") AND ("vital sign" OR "vitals")

Criterios para selección de estudios

La selección de estudios se llevó a cabo utilizando los resultados obtenidos de la cadena de búsqueda documental. Cada texto fue revisado inicialmente en función del título y resumen, posteriormente se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión filtrando los archivos que cumplieran los requerimientos. Finalmente, se evaluó la calidad de los estudios seleccionados de manera individual mediante un análisis integral.

Como parte del protocolo de revisión, los criterios de inclusión y exclusión definidos consistieron en los siguientes:

Criterios de inclusión:

- Artículos de revista y de congresos.

Criterios de exclusión:

- Artículos no relacionados a propuestas de recolección de energía en dispositivos de monitorización de signos vitales.
- Artículos en idioma distinto al inglés.
- Artículos publicados antes del año 2018.
- Trabajos que no se encuentran accesibles.
- Documentos duplicados o que sean revisiones de literatura, editoriales, resúmenes, libros y capítulos de libros.

Los criterios de inclusión y exclusión se centraron en garantizar que no se omitieran estudios importantes. En particular, se eligió el idioma inglés porque la mayoría de las investigaciones relevantes se publican en este idioma; por otro lado, el año mínimo de publicación (2018) buscó garantizar que se seleccionaran trabajos actualizados, es así que el rango de búsqueda fue desde el año 2018 al mes de marzo del año 2024.

Evaluación de calidad

Evaluar la calidad de los estudios permitió clasificar los trabajos de alta calidad que garantizan solidez en la investigación asegurando resultados confiables, separándolos de aquellos que se veían limitados en la metodología por sesgos que podrían terminar afectando las inferencias finales. Conforme a ello, en cada estudio se aplicaron varias preguntas y se estableció una puntuación mínima de 0 en caso de no responder a la interrogante, al obtener una respuesta parcial se calificó con 0.5 y el valor máximo de 1 se otorgó a los trabajos que cumplieran lo solicitado.

Criterios de evaluación (*Quality Criteria*, QC):

- QC1: ¿El estudio incluye el uso de un mecanismo de EH para alimentación del dispositivo de monitorización de signos vitales?
- QC2: ¿En el estudio se hacen pruebas con componentes reales?
- QC3: ¿El documento especifica qué tipo de signos vitales está monitorizando el dispositivo?
- QC4: ¿En el documento se menciona la ubicación del dispositivo de monitorización de signos vitales en el paciente de prueba?

El puntaje de corte que los estudios debieron mantener en la evaluación de calidad para ser considerados en la SLR fue de 2. Este valor se determinó según el promedio de los criterios de evaluación, certificando así la calidad de los trabajos seleccionados.

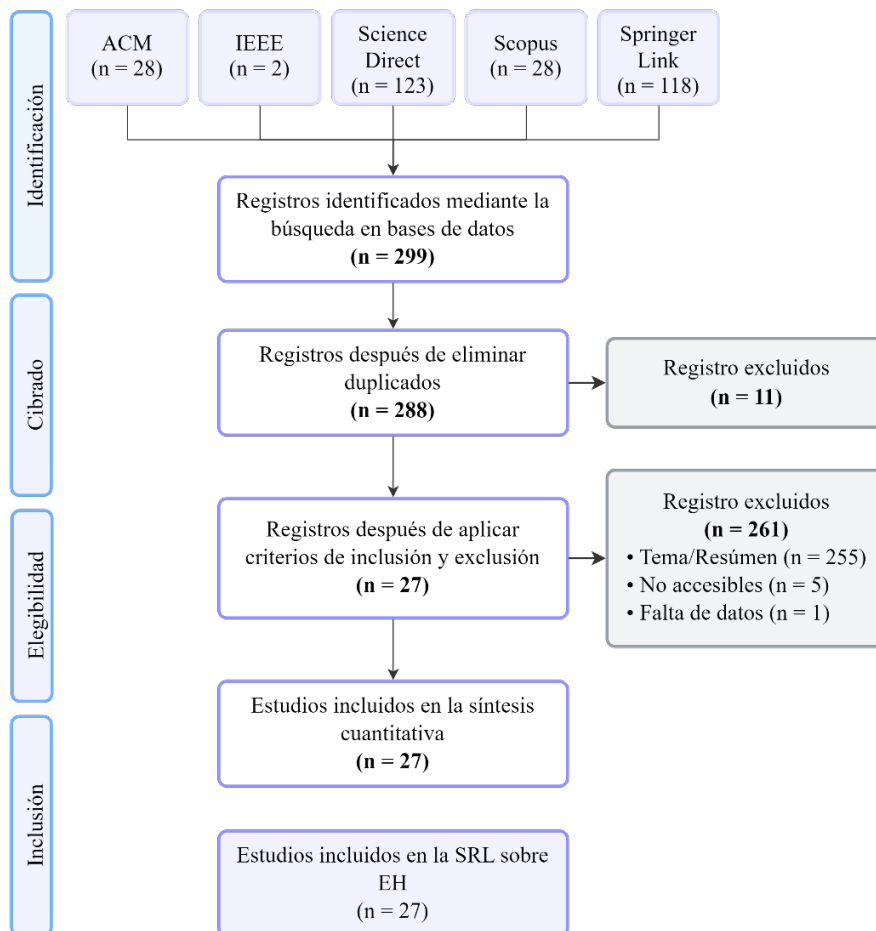
Aplicación del protocolo de búsqueda y extracción de datos

En la Figura 2 se puede visualizar el diagrama con el resultado de la aplicación de los criterios previamente definidos como parte de la metodología PRISMA.

Primero, se realizó una indagación exhaustiva donde se aplicó la cadena de búsqueda en las diferentes bases de datos científicas, para identificar los trabajos relevantes. Para ello, se exportaron los datos de los estudios encontrados en formato Bibtex, conservando el contenido en archivos de texto plano. Luego se importaron en la plataforma Parsifal (<https://parsif.al/>), que sirvió de apoyo para el desarrollo de este trabajo investigativo.

Figura 2

Diagrama de flujo PRISMA



Adaptado de (García-Holgado & García-Peñalvo, 2019) - (Moher et al., 2009).

La plataforma Parsifal facilitó la gestión de los artículos, llevando el conteo de los duplicados, y categorizando los estudios aceptados y rechazados. También permitió evaluar la calidad de los documentos controlando su valoración, optimizando así el proceso de la SLR. Después de confirmar que los estudios se encontraran en la plataforma Parsifal, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión.

Finalmente, los artículos que superaron el filtro anterior fueron sometidos a una evaluación más detallada que involucró la revisión del documento completo para determinar si cumplían los estándares de calidad al sobrepasar el punto de corte.

Una vez aplicada cada una de las etapas de selección detalladas en la Figura 2, se obtuvo lo siguiente:

- En la fase de búsqueda exploratoria se encontró un total de 299 artículos en las diferentes bases de datos: 28 en ACM Digital Library, 2 en IEEE Xplore, 123 en ScienceDirect, 28 en Scopus y 118 en SpringerLink.
- Se registraron 11 trabajos duplicados, dejando 288 artículos restantes por analizar.
- Luego de aplicar los criterios de inclusión y exclusión permanecieron 27 estudios en el proceso de selección para el análisis detallado requerido en la SRL.

Tras completar la lectura de los trabajos aceptados, se utilizó una hoja de extracción de datos para tabular la información, considerando la importancia de cada variable y la capacidad de los hallazgos para dar respuesta a las preguntas de investigación. Los datos que se extrajeron de los documentos seleccionados comprendieron:

- Tipo de EH empleado (RQ1): fotovoltaica, híbrida, piezoeléctrica, termodinámica o triboeléctrica, etc.
- Signos vitales monitorizados (RQ2): presión arterial, frecuencia cardíaca (FC), frecuencia respiratoria (FR), saturación de oxígeno, temperatura (T), entre otros.
- Generación de energía (RQ3): potencia variable medida en vatios (W), voltios (V) o amperios (A) en el caso de la corriente.

Área del cuerpo donde se ubica el dispositivo de monitoreo de signos vitales (RQ4): varía de acuerdo con el estudio realizado.

Resultados y Discusión

En la Tabla 1 se encuentran las citas de los artículos seleccionados y los datos que se obtuvieron de cada uno de ellos.

Tabla 1

Datos obtenidos de los artículos analizados

FUENTE	MECANISMO DE EH (RQ1)	SIGNO VITAL (RQ2)	GENERACIÓN DE ENERGÍA (RQ3)	UBICACIÓN DEL DISPOSITIVO (RQ4)
(Bose et al., 2020)	Termoeléctrico	Frecuencia cardíaca	4,6 μ W – 20 μ W	Pecho - Tórax
(Ghafouri & Manavizadeh, 2023)	Triboeléctrico	pH	N/A	N/A
(Qiu et al., 2019)	Triboeléctrico	Estado respiratorio	200 μ A 1000 V	Pecho - Tórax
(S. Wang et al., 2019)	Triboeléctrico	Frecuencia respiratoria	0,88 V	Rostro
(Sun et al., 2018)	Híbrido	Frecuencia cardíaca	55 V – 86 V	Muñeca

FUENTE	MECANISMO DE EH (RQ1)	SIGNO VITAL (RQ2)	GENERACIÓN DE ENERGÍA (RQ3)	UBICACIÓN DEL DISPOSITIVO (RQ4)
(Mao et al., 2023)	Triboeléctrico	Frecuencia cardíaca	N/A	N/A
(He et al., 2022)	Piezoeléctrico	Temperatura Frecuencia respiratoria	0,15 μ A 8 V	T: Mano (Palma y dedos) FR: Rostro
(Yi et al., 2022)	Triboeléctrico	Pulso arterial (Radial)	816 mW/ m ²	Muñeca
(Lyu et al., 2020)	Híbrido	Frecuencia cardíaca Frecuencia respiratoria	1 μ W 1,3 V	N/A
(M. Wang et al., 2018)	Triboeléctrico	Estado respiratorio	1,7 μ A 2,4 V 1,3 mW	Rostro (Mascarilla)
(Wu et al., 2023)	Triboeléctrico	Frecuencia cardíaca	30 V 16 μ A	Muñeca
(Maity et al., 2023)	Híbrido	Frecuencia cardíaca Frecuencia respiratoria	N/A	FC: Muñeca FR: Rostro (Mascarilla)
(Panahi et al., 2020)	Piezoeléctrico	Frecuencia respiratoria	N/A	Pecho - Tórax
(Na et al., 2022)	Termoeléctrico	Estado respiratorio	18,13 mV 2,74 μ A 12,6 nW	Rostro (Mascarilla)
(Fu et al., 2021)	Triboeléctrico	Frecuencia cardíaca	0,6 μ A 10 V	Muñeca
(Kang et al., 2022)	Piezoeléctrico	Frecuencia cardíaca	1,16 μ A 97,5 V	Muñeca Cuello Tobillo
(Fahad et al., 2022)	Triboeléctrico	Frecuencia cardíaca Frecuencia respiratoria	N/A	Pecho - Tórax
(Gunasekhar & Anand Prabu, 2023)	Triboeléctrico	Frecuencia cardíaca Frecuencia respiratoria	0,85 V - 6,27 V	Pecho – Tórax Músculo trapecio
(Mokhtari & Al Ahmad, 2019)	Piezoeléctrico	Frecuencia respiratoria	N/A	Pecho - Tórax
(Zhang et al., 2023)	Termoeléctrico	Frecuencia cardíaca Temperatura	N/A	Muñeca
(Wen et al., 2023)	Híbrido	Estado respiratorio	N/A	Rostro (Mascarilla)
(Chung et al., 2020)	Radiofrecuencia	Frecuencia cardíaca Frecuencia respiratoria Temperatura Oxígeno en la sangre	Con batería: 45mAh Sin batería: suministro indefinido	Pecho - Tórax Tobillo Pie hacia los dedos Muñeca hasta la mano
(Gil et al., 2022)	Radiofrecuencia	pH	0,44 mA 1,8 V	Modelo anatómico realista de mama humano
(Ghosh et al., 2022)	Triboeléctrico	Frecuencia cardíaca Estado respiratorio	325 mW/ m2	FC: Muñeca - Cuello FR: Rostro (Surco naso labial)
(H. L. Wang et al., 2022)	Triboeléctrico	Frecuencia cardíaca	N/A	Muñeca
(Habibagahi et al., 2022)	Radiofrecuencia	Frecuencia cardíaca Temperatura Presión arterial Oxígeno en la sangre	3 V 0,1 W – 1 W	Cuello (Implante)
(Ahn et al., 2020)	Piezoeléctrico	Pulso arterial (Radial y carótida) Estado respiratorio	N/A	Muñeca

N/A: no disponible.

Después de la selección de los datos, se llevó a cabo un análisis de los aspectos asociados con las preguntas de investigación correspondiente:

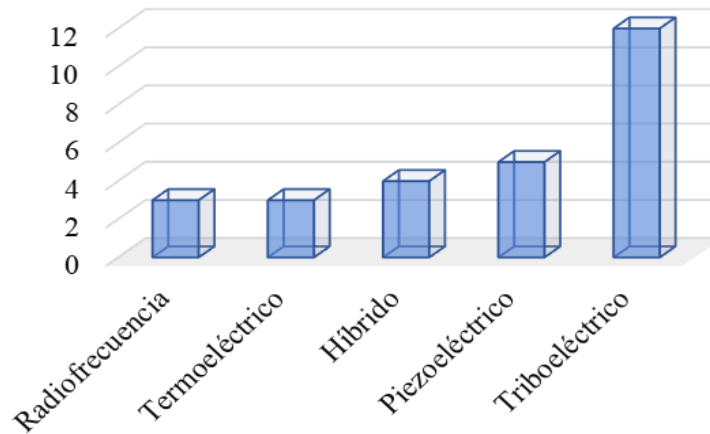
RQ1: ¿Qué mecanismos de EH se utilizan en dispositivos de monitorización de signos vitales?

Para abordar la primera pregunta de investigación, es preciso recalcar la diversidad de mecanismos de recolección de energía aplicables en dispositivos de monitorización de signos vitales. En la revisión detallada de los artículos (Figura 3), se destacó que el tipo de mecanismo frecuentemente empleado para los dispositivos es la captación de energía triboeléctrica, pues fue mencionada en 12 ocasiones. En contraste con los mecanismos termoeléctrico y de radiofrecuencia que únicamente aparecieron 3 veces cada uno.

Siendo evidente que, aunque existen disímiles enfoques de EH, la opción preferida que sobresale para el desarrollo de dispositivos de monitoreo de signos vitales, según la literatura examinada, fue la recolección de energía triboeléctrica.

Figura 3

Mecanismos de EH aplicados en los estudios

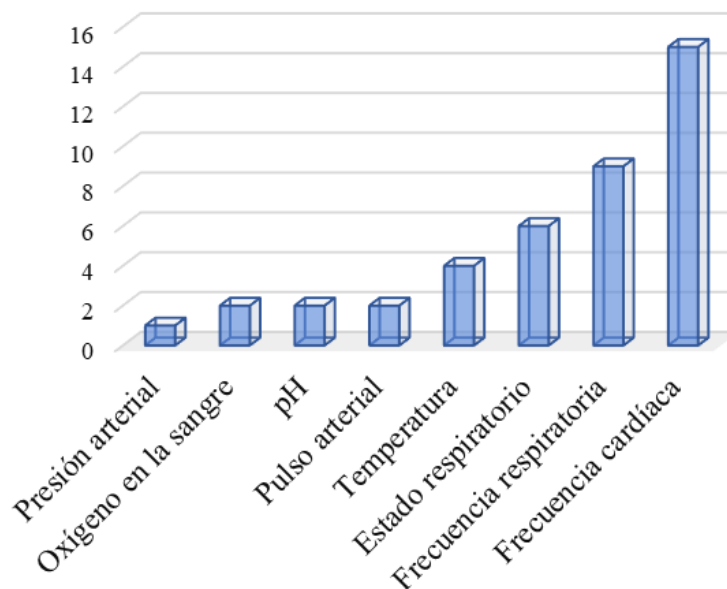


RQ2: ¿Qué signos vitales se monitorizan con los dispositivos?

La monitorización de ciertos signos vitales se vuelve fundamental cuando algunas enfermedades son desencadenadas por anomalías en alguna constante vital específica, o en otras ocasiones a modo de prevención se supervisa que los valores se mantengan en un rango normal.

Figura 4

Signos vitales considerados en los dispositivos de monitorización



La Figura 4 muestra los signos vitales considerados en los estudios analizados. La frecuencia cardíaca fue el signo vital mayormente monitorizado, ya que fue mencionado en 15 estudios. Luego apareció la frecuencia respiratoria que fue objeto de monitoreo en 9 artículos, y 6 investigaciones hicieron seguimiento del estado respiratorio, pues controlan cuando la

respiración es normal, lenta, rápida, superficial o profunda. En menor medida varios trabajos hicieron referencia en una sola ocasión a la presión arterial, el pH y los niveles de oxígeno en la sangre.

RQ3: ¿Cuál es la producción energética de los distintos mecanismos de recolección de energía en cada caso?

Los mecanismos de recolección de energía mostraron una amplia variabilidad en producción de energía, tal como lo demuestra la Tabla 2 que indica la capacidad de generación energética de los tipos de EH identificados en esta revisión sistemática de literatura.

Por ejemplo, el sistema de radiofrecuencia ofreció una capacidad alta en producción de potencia alcanzando 1 W, mientras que los mecanismos termoelectricos generaron energía más baja de aproximadamente 12,6 nW.

Por otro lado, la tecnología triboeléctrica presenta un valor mínimo de 0,6 μA y máximo de 200 μA en comparación con la radiofrecuencia que alcanza hasta 0,44 mA de corriente; además, el tipo de recolección triboeléctrica apareció exhibiendo una producción de voltaje inferior de alrededor de 0,88 V; sin embargo, logró una alta eficiencia teórica al generar hasta 1000 V bajo una frecuencia de 2.5Hz, de acuerdo a los investigadores que logran dicho valor.

Cabe aclarar que no en todas las publicaciones se mencionan los valores de potencia, corriente y voltaje obtenidos por el mecanismo de EH aplicado, por lo que la comparación de este criterio no fue muy equivalente; sin embargo, es posible ver en la Tabla 2 una tendencia del rango de valores para cada mecanismo.

Tabla 2

Rango de valores de generación energética de los dispositivos, según mecanismos de EH

MECANISMOS DE EH	POTENCIA (W)	CORRIENTE (A)	VOLTAJE (V)
Híbrido	1 μW	-	1,3 – 88 V
Piezoeléctrico	-	0,15 – 65 μA	8 V
Radiofrecuencia	0,1 – 1 W	0,44 mA	1,8 – 3 V
Termoelectrico	12,6 nW – 20 μW	2,74 μA	18,13 mV
Triboeléctrico	1,3 mW – 816 mW/m ²	0,6 – 200 μA	0,88 V – 1000 V

RQ4: ¿En qué parte del cuerpo se ubica el dispositivo de monitorización de signos vitales?

El ser humano posee diferentes puntos estratégicos en el cuerpo para realizar mediciones de signos vitales, aunque la elección dependerá principalmente del parámetro vital que se pretende monitorizar. En el caso de los animales es algo similar.

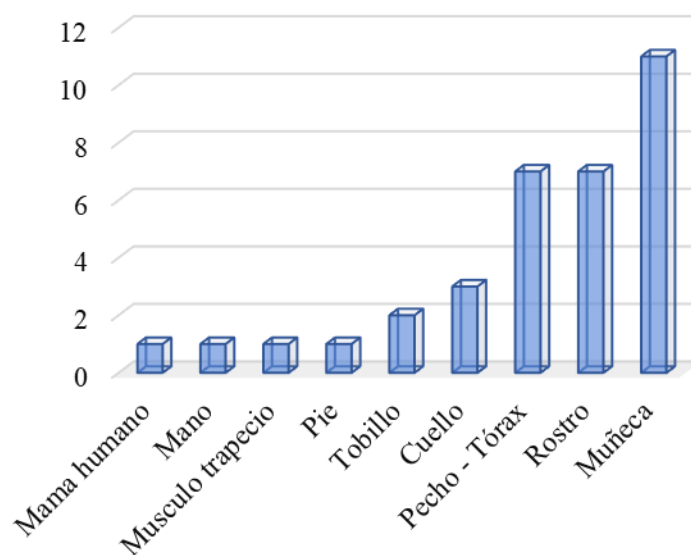
En la Figura 5 se observa que los dispositivos tienden a ubicarse con mayor énfasis en la muñeca, ubicación que fue mencionada 11 veces en los artículos analizados. Después se señala el área del pecho, tórax y el rostro como otras localizaciones comunes donde monitorizar, a diferencia de la mano, el músculo trapecio, el pie e inclusive de un modelo realista de mama humana que en el estudio utilizaron para las pruebas, que ocupan el último lugar en cuanto a preferencia de ubicación para dispositivos de medición.

En anteriores revisiones de literatura sobre recolección de energía, como la de Hezekiah et al. (2023) se mencionó que la radiofrecuencia es el mecanismo de EH más utilizado en forma

general en dispositivos inalámbricos; sin embargo, para el caso que se analizó (monitorización de signos vitales), se encontró que el método más aplicado fue el triboeléctrico. Esto demuestra que radiofrecuencia fue la opción principal en literatura general; no obstante, en aplicaciones como la monitorización de signos vitales prevalece la tecnología triboeléctrica, posiblemente porque se aprovechan las fuentes de energía disponibles de manera efectiva en este contexto.

Figura 5

Parte del cuerpo para ubicación de dispositivos de monitoreo



No obstante, Shuvo y colegas determinaron en su investigación del 2022 que los nanogeneradores triboeléctricos (TENGs) tienen limitaciones por baja corriente y daños en la fricción de las superficies de contacto, por lo que necesitan mejorar para adoptarlas en dispositivos de monitorización. Mientras, en esta investigación se demostraron que la mayoría de estudios que aplican esta técnica de *energy scavenging* se dan desde el año de publicación del mencionado estudio. Aunque hay que tener en cuenta que la energía recolectada en cada dispositivo puede variar según las condiciones ambientales, el tiempo, la ubicación en el paciente o el tipo de dispositivo que monitoriza los signos vitales.

El mecanismo híbrido, en comparación, obtuvo un porcentaje de trabajos encontrados relativamente bajo entre todos los incluidos; a pesar de esto, Mahmood et al. (2023) señalan en su investigación que en situaciones donde se requiere de mayor suministro de energía es conveniente aplicar *energy harvesting* híbrido, que al combinar múltiples fuentes energéticas, se logra cubrir las limitaciones de otra fuente particular con la finalidad de mejorar la confiabilidad de los dispositivos IoT sin baterías; por otro lado, según Navia et al. (2015), la implementación de sistemas y mecanismos híbridos en el campo tecnológico es una tendencia muy importante en las últimas décadas, dada la adaptabilidad que poseen para aprovechar las ventajas en diferentes enfoques.

Además, hay que recalcar que este estudio proporciona conocimiento potencial sobre los mecanismos de recolección de energía y la monitorización de signos vitales, sin embargo, podría verse limitado por posibles sesgos, relacionados con la selección de los estudios donde se podría haber excluidos inadvertidamente artículos relevantes debido a las restricciones de las bases de datos consultadas o por los años de publicación establecidos en los criterios de exclusión, influyendo en la interpretación de los resultados del trabajo.

Conclusiones

Esta revisión sistemática de literatura enfocada en los mecanismos de recolección de energía utilizados en dispositivos de monitorización de signos vitales permite visualizar el avance constante de esta tecnología autónoma y sostenible empleada para el abastecimiento energético de dispositivos, destacando a su vez la diversidad de técnicas aplicadas para captar energía y convertirla en electricidad para el funcionamiento de éstos.

Se identifica que el mecanismo triboeléctrico es el predominante en los trabajos analizados. Este resalta por la versatilidad que tiene al captar energía a partir de la fricción de dos materiales, constituidos por el dispositivo de monitorización y la zona del cuerpo en que se ubica. Otra opción para la generación triboeléctrica, en el caso de dispositivos utilizados en seres humanos, sería la fricción entre el dispositivo y la ropa.

Si de producción de energía se trata, la radiofrecuencia ofrece mayor capacidad para generar potencia y corriente, aunque su voltaje disminuye considerablemente en comparación con el mecanismo triboeléctrico, lo que puede ser resuelto con mecanismos de transformación de voltaje; sin embargo, este tipo de EH requiere de una infraestructura adicional para poder funcionar.

La muñeca es el área principal donde se realiza el monitoreo de signos vitales, relacionándose completamente con el hecho de que la frecuencia cardíaca en esta ubicación puede ser más precisa que en otras partes del cuerpo; sin embargo, el pecho – tórax es otra ubicación manejable para el monitoreo de la FC, en comparación al rostro que está directamente vinculada con el control de la frecuencia respiratoria.

Los dispositivos, en su mayoría, son aplicables en lugares expuestos como la muñeca y el rostro, pues facilitan la medición dada la accesibilidad y conveniencia al momento de colocar los dispositivos de monitorización de signos vitales, sin afectar mayormente las actividades que realiza la persona.

Los mecanismos analizados pueden ser aplicados para el monitoreo de signos vitales en otros seres vivos, además de personas, ya que los seres humanos y varios tipos de animales domésticos comparten ciertas similitudes en cuanto a anatomía, fisiología y comportamiento; no obstante, se debe considerar principalmente el rango de funcionamiento normal de los signos vitales de cada especie, asimismo definir la adecuada ubicación para obtener mayor precisión en las mediciones.

Para trabajos posteriores, aún es necesario estudiar la optimización de la eficiencia energética y durabilidad del mecanismo triboeléctrico; también se puede analizar las características que hacen superior al EH por radiofrecuencia y adaptarlas para hacerlas más eficiente; por otro lado, aunque se encontraron pocos casos en el estudio, la aplicación de mecanismos híbridos podría combinar las fortalezas de dos mecanismos, al tiempo que se superan sus limitaciones.

Además, se debe enfatizar que el diseño de dispositivos debe contemplar que la tecnología utilizada no resulte intrusiva para el ser vivo, esperando que se puedan elaborar sistemas de monitorización en áreas externas del cuerpo del paciente para llevar a cabo el control de los signos vitales.

Reconocimientos

Los autores declaran la contribución y participación equitativa de roles de autoría para esta publicación.

Referencias

- Ahn, S., Cho, Y., Park, S., Kim, J., Sun, J., Ahn, D., Lee, M., Kim, D., Kim, T., Shin, H., & Park, J.-J. (2020). Wearable multimode sensors with amplified piezoelectricity due to the multi local strain using 3D textile structure for detecting human body signals. *Nano Energy*, *74*, 104932. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104932>
- Ali, A., Shaukat, H., Bibi, S., Altabey, W. A., Noori, M., & Kouritem, S. A. (2023). Recent progress in energy harvesting systems for wearable technology. *Energy Strategy Reviews*, *49*, 101124. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101124>
- Blažević, D., Philipp, S., Ruuskanen, J., Dizdarevic, J., Niiranen, R., Rasilo, P., & Jukan, A. (2022). A farm animal kinetic energy harvesting device for IoT applications. En P. Balaya, N. C. Das, & S. Xu (Eds.), *Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications XII* (p. 14). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2618298>
- Bose, S., Shen, B., & Johnston, M. L. (2020). 26.5 A 20 μ W heartbeat detection system-on-chip powered by human body heat for self-sustaining wearable healthcare. *2020 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC)*, 408-410. <https://doi.org/10.1109/ISSCC19947.2020.9063071>
- Chung, H. U., Rwei, A. Y., Hourlier-Fargette, A., Xu, S., Lee, K., Dunne, E. C., Xie, Z., Liu, C., Carlini, A., Kim, D. H., Ryu, D., Kulikova, E., Cao, J., Odland, I. C., Fields, K. B., Hopkins, B., Banks, A., Ogle, C., Grande, D., ... Rogers, J. A. (2020). Skin-interfaced biosensors for advanced wireless physiological monitoring in neonatal and pediatric intensive-care units. *Nature Medicine*, *26*(3), 418-429. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0792-9>
- Dionisi, A., Marioli, D., Sardini, E., & Serpelloni, M. (2016). Autonomous wearable system for vital signs measurement with energy-harvesting module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *65*(6), Article 6. <https://doi.org/10.1109/TIM.2016.2519779>
- Fahad, M. M., Reza, M. S., Prasad, G., Jaisankar, S. N., Kim, K. J., & Kim, H. (2022). Polysomnographic observation using triboelectric pressure sensor composed of polymer-pairs Having coarse surface. *Fibers and Polymers*, *23*(6), 1490-1499. <https://doi.org/10.1007/s12221-022-4969-3>
- Fu, K., Zhou, J., Wu, H., & Su, Z. (2021). Fibrous self-powered sensor with high stretchability for physiological information monitoring. *Nano Energy*, *88*, 106258. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106258>
- García-Holgado, A., & García-Peñalvo, F. J. (2019). Ecosistemas software: Análisis de revisiones sistemáticas de literatura. *TICAI 2018 TICs para el Aprendizaje de la Ingeniería*, 91-98. <http://hdl.handle.net/10366/140507>
- Ghafouri, T., & Manavizadeh, N. (2023). A 3D-printed millifluidic device for triboelectricity-driven pH sensing based on ZnO nanosheets with super-Nernstian response. *Analytica Chimica Acta*, *1267*, 341342. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341342>
- Ghosh, S. K., Kim, M. P., Na, S., Lee, Y., Park, J., Cho, S., Cho, J., Kim, J. J., & Ko, H. (2022). Ultra-stretchable yet tough, healable, and biodegradable triboelectric devices with microstructured and ionically crosslinked biogel. *Nano Energy*, *100*, 107438. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107438>
- Gil, B., Ip, H., Kassanos, P., Lo, B., Yang, G.-Z., & Anastasova, S. (2022). Smart implanted access port catheter for therapy intervention with pH and lactate biosensors. *Materials Today Bio*, *15*, 100298. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2022.100298>
- Gunasekhar, R., & Anand Prabu, A. (2023). Polyvinylidene fluoride/aromatic hyperbranched polyester 2nd generation based triboelectric sensor for polysomnographic and health monitoring applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, *355*, 114311. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114311>
- Habibagahi, I., Omidbeigi, M., Hadaya, J., Lyu, H., Jang, J., Ardell, J. L., Bari, A. A., & Babakhani, A. (2022). Vagus nerve stimulation using a miniaturized wirelessly powered stimulator in pigs. *Scientific Reports*, *12*(1), 8184. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11850-0>
- Hadiyoso, S., Tullloh, R., Rohmah, Y., & Alfaruq, A. (2021). Design and development armband vital sign monitor for health-care monitoring. *Journal of Medical Signals & Sensors*, *11*(3), 208. https://doi.org/10.4103/jmss.JMSS_29_20

- He, J., Li, S., Hou, X., Zhou, Y., Li, H., Cui, M., Guo, T., Wang, X., Mu, J., Geng, W., & Chou, X. (2022). A non-contact flexible pyroelectric sensor for wireless physiological monitoring system. *Science China Information Sciences*, 65(2), 122402. <https://doi.org/10.1007/s11432-020-3175-6>
- Heidari, H., Onireti, O., Das, R., & Imran, M. (2021). Energy harvesting and power management for IoT devices in the 5G era. *IEEE Communications Magazine*, 59(9), 91-97. <https://doi.org/10.1109/MCOM.101.2100487>
- Hezekiah, J. D. K., Ramya, K. C., Radhakrishnan, S. B. K., Kumarasamy, V. M., Devendran, M., Ramalingam, A., & Maheswar, R. (2023). Review of next-generation wireless devices with self-energy harvesting for sustainability improvement. *Energies*, 16(13), 5174. <https://doi.org/10.3390/en16135174>
- Isioto, N. N., Nwabueze, C., & Dickson, R. (2022). Comparative evaluation of energy harvesting techniques for sustainable energy in low power applications. *Int. J. Innov. Eng. Technol. Sci.*, 5(2), Article 2.
- Kang, S., Kim, S. H., Lee, H. B., Mhin, S., Ryu, J. H., Kim, Y. W., Jones, J. L., Son, Y., Lee, N. K., Lee, K., Kim, Y., Jung, K. H., Han, H., Park, S. H., & Kim, K. M. (2022). High-power energy harvesting and imperceptible pulse sensing through peapod-inspired hierarchically designed piezoelectric nanofibers. *Nano Energy*, 99, 107386. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107386>
- Kim, D. H., Shin, H. J., Lee, H., Jeong, C. K., Park, H., Hwang, G., Lee, H., Joe, D. J., Han, J. H., Lee, S. H., Kim, J., Joung, B., & Lee, K. J. (2017). In vivo self-powered wireless transmission using biocompatible flexible energy harvesters. *Advanced Functional Materials*, 27(25), 1700341. <https://doi.org/10.1002/adfm.201700341>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in software engineering*. 2.
- Li, Z., Zhu, G., Yang, R., Wang, A. C., & Wang, Z. L. (2010). Muscle-driven in vivo nanogenerator. *Advanced Materials*, 22(23), 2534-2537. <https://doi.org/10.1002/adma.200904355>
- Lin, W., Wei, Y., Wang, X., Zhai, K., & Ji, X. (2023). Study on human motion energy harvesting devices: A review. *Machines*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/machines11100977>
- Lin, Z., Chen, J., Li, X., Zhou, Z., Meng, K., Wei, W., Yang, J., & Wang, Z. L. (2017). Triboelectric nanogenerator enabled body sensor network for self-powered human heart-rate monitoring. *ACS Nano*, 11(9), 8830-8837. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b02975>
- Lyu, H., Wang, Z., & Babakhani, A. (2020). A UHF/UWB hybrid RFID tag with a 51-m energy-harvesting sensitivity for remote vital-sign monitoring. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 68(11), 4886-4895. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.3017674>
- Mahmood, A. I., Gharghan, S. K., Eldosoky, M. A., & Soliman, A. M. (2023). *Energy harvesting-based biomedical applications: A review*. 020022. <https://doi.org/10.1063/5.0119283>
- Maity, K., Mondal, A., & Saha, M. C. (2023). Cellulose nanocrystal-based all-3D-printed pyro-piezoelectric nanogenerator for hybrid energy harvesting and self-powered cardiorespiratory monitoring toward the human-machine interface. *ACS Applied Materials & Interfaces*, acsami.2c21680. <https://doi.org/10.1021/acscami.2c21680>
- Manzano Ramos, E. A., & Bejarano Reyes, M. A. (2021). Implementación de un sistema de monitoreo a nivel de prototipo de signos vitales: Pulso, temperatura y saturación de oxígeno para pacientes. *Interfases*, 014. <https://doi.org/10.26439/interfases2021.n014.5168>
- Mao, J., Zhou, P., Wang, X., Yao, H., Liang, L., Zhao, Y., Zhang, J., Ban, D., & Zheng, H. (2023). A health monitoring system based on flexible triboelectric sensors for intelligence medical internet of things and its applications in virtual reality. *Nano Energy*, 118, 108984. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108984>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Mokhtari, S., & Al Ahmad, M. (2019). Portable piezoelectric cardiac abnormality detection. *Alexandria Engineering Journal*, 58(3), 1053-1061. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.09.008>

- Na, Y., Kim, S., Mallem, S. P. R., Yi, S., Kim, K. T., & Park, K.-I. (2022). Energy harvesting from human body heat using highly flexible thermoelectric generator based on Bi₂Te₃ particles and polymer composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 924, 166575. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166575>
- Navia, M., Bonastre, A., & Campelo, J. C. (2015). Hybrid monitoring proposal for wireless sensor network. *2015 Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering*, 320-324. <https://doi.org/10.1109/APCASE.2015.63>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lahu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Panahi, A., Hassanzadeh, A., & Moulavi, A. (2020). Design of a low cost, double triangle, piezoelectric sensor for respiratory monitoring applications. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 30, 100378. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2020.100378>
- Pozo Fernández, B., Núñez Estévez, C., Fernández Hermida, X., & Marcos Acevedo, J. (2018). Feasibility analysis of energy harvesting with piezoelectric devices in oceanographic buoys. *Instrumentation Viewpoint*, 20, 57. <http://hdl.handle.net/2117/126267>
- Qiu, H.-J., Song, W.-Z., Wang, X.-X., Zhang, J., Fan, Z., Yu, M., Ramakrishna, S., & Long, Y.-Z. (2019). A calibration-free self-powered sensor for vital sign monitoring and finger tap communication based on wearable triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 58, 536-542. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.069>
- Shuvo, M. M. H., Titirsha, T., Amin, N., & Islam, S. K. (2022). Energy harvesting in implantable and wearable medical devices for enduring precision healthcare. *Energies*, 15(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/en15207495>
- Sun, J.-G., Yang, T.-N., Wang, C.-Y., & Chen, L.-J. (2018). A flexible transparent one-structure tribo-piezoelectric hybrid energy generator based on bio-inspired silver nanowires network for biomechanical energy harvesting and physiological monitoring. *Nano Energy*, 48, 383-390. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.03.071>
- Wang, H. L., Guo, Z. H., Pu, X., & Wang, Z. L. (2022). Ultralight iontronic triboelectric mechanoreceptor with high specific outputs for epidermal electronics. *Nano-Micro Letters*, 14(1), 86. <https://doi.org/10.1007/s40820-022-00834-4>
- Wang, M., Zhang, J., Tang, Y., Li, J., Zhang, B., Liang, E., Mao, Y., & Wang, X. (2018). Air-flow-driven triboelectric nanogenerators for self-powered real-time respiratory monitoring. *ACS Nano*, 12(6), 6156-6162. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b02562>
- Wang, S., Tai, H., Liu, B., Duan, Z., Yuan, Z., Pan, H., Su, Y., Xie, G., Du, X., & Jiang, Y. (2019). A facile respiration-driven triboelectric nanogenerator for multifunctional respiratory monitoring. *Nano Energy*, 58, 312-321. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.042>
- Wen, D.-L., Huang, P., Li, B.-Y., Qiu, Y., Wang, Y.-L., Zhang, X.-R., Deng, H.-T., & Zhang, X.-S. (2023). Silk fibroin/Ag nanowire-based multifunctional sensor for wearable self-powered wireless multi-sensing microsystems. *Nano Energy*, 113, 108569. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108569>
- Wu, Y., Cui, X., Wu, H., & Su, Z. (2023). All-polymeric fibrous triboelectric nanogenerator for self-powered intelligent active motions monitoring system. *Chemical Engineering Journal*, 469, 143708. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143708>
- Yi, Q., Pei, X., Das, P., Qin, H., Lee, S. W., & Esfandyarpour, R. (2022). A self-powered triboelectric MXene-based 3D-printed wearable physiological biosignal sensing system for on-demand, wireless, and real-time health monitoring. *Nano Energy*, 101, 107511. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.107511>
- Zhang, L., Fang, R., Li, X., Tian, C., Li, J., Cui, X., & Zhang, H. (2023). Self-powered physiological monitoring strategy enabled by adaptive dual-network thermogalvanic hydrogels. *Sensors and Actuators A: Physical*, 361, 114604. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114604>