

MEJORA DE LA GESTION DE LOS RESIDUOS INDUSTRIALES A TRAVÉS DE LA FILOSOFÍA LEAN Y INDUSTRIA 4.0

Elena Etelvina Díaz Terradillos¹, <https://orcid.org/0000-0001-5553-5406>, elenadt1@msn.com
Helena Victorovna Guitiss Navas², <https://orcid.org/0000-0003-4637-0755>, hvgn@fct.unl.pt
Fernando Manuel Bigares Charrua-Santos³, <https://orcid.org/0000-0002-2038-0237>, bigares@ubi.pt

1. Department of Electromechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Beira Interior, Portugal
2. UNIDEMI, Department of Mechanical and Industrial Engineering, NOVA School of Science and Technology, Universidade NOVA de Lisboa, Portugal.
3. C-MAST, Department of Electromechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Beira Interior, Portugal.

Submitted: 16/12/2021. Accepted: 24/04/2022
Published: 26/04/2022

RESUMEN

Objetivos: Ante la creciente importancia de la sostenibilidad, se propone un modelo eficiente que permite a identificación y cuantificación de los residuos industriales.

Metodología: Primero se realizó una revisión bibliográfica de los modelos existentes de aplicación conjunta: Sostenibilidad, Filosofía Lean e Industria 4.0. Análisis crítico de los modelos existentes de aplicación conjunta de estos conceptos. Elaboración de la propuesta del modelo y análisis de los resultados.

Conclusiones: El modelo propuesto, además de contribuir para el cumplimiento de las leyes vigentes, permite una mejor percepción de los residuos producidos, incluyendo su caracterización. Esto promueve al encaminamiento de los residuos a las entidades responsables y competentes para su recogida y reciclaje, mostrando un cambio en la empresa en las políticas de gestión ambiental.

Limitación / implicación de la investigación: El coste inherente a la reorganización del diseño del *layout* puede ser limitante, ya que depende del tipo, tamaño, características de la empresa y la flexibilidad de su sistema de producción existente.

Originalidad / Valor del papel: Es un modelo nuevo de aplicación conjunta de los tres conceptos y colmata el vacío de los modelos ya existentes. Esto permite a las organizaciones tener un mayor conocimiento sobre los residuos producidos.

PALABRAS CLAVE: filosofía lean, gestión de residuos, industria 4.0, sostenibilidad.

IMPROVING THE MANAGEMENT OF INDUSTRIAL WASTE THROUGH THE LEAN PHILOSOPHY AND INDUSTRY 4.0

ABSTRACT

Purpose: Given the growing importance of sustainability, an efficient model is proposed that allows the identification and quantification of industrial waste.

Methodology/Approach: First, a bibliographic review of the existing models of joint application was carried out: Sustainability, Lean Philosophy, and Industry 4.0. Critical analysis of the existing models of joint application of these concepts. Preparation of the model proposal and analysis of the results.

Findings: The proposed model, in addition to contributing to compliance with current laws, allows a better perception of the waste produced, including its characterization. This promotes the directing of waste to responsible and competent entities for its collection and recycling, showing a change in the company in environmental management policies.

Research Limitation/implication: The inherent cost of reorganizing the layout design can be limiting, as it depends on the type, size, business characteristics, and flexibility of your existing production system.

Originality/Value of paper: It is a new model of joint application of the three concepts and fills the void of the existing models. This allows organizations to have a better understanding of the waste produced.

KEYWORD: lean philosophy, waste management, industry 4.0, sustainability.

1. INTRODUCCIÓN

En general, la industria ha pasado por varias fases y ha crecido exponencialmente. Este crecimiento por un lado es beneficioso para la sociedad ya que trae consigo la innovación de productos, procesos y métodos de trabajo, pero por otro lado toda esta evolución directa o indirectamente acaba produciendo efectos negativos sobre el medio ambiente, ya sea por el uso excesivo de agua, energía, materia prima en los procesos de producción, la liberación de emisiones de CO₂, así como la producción de una amplia gama de residuos industriales. Sin embargo, en los últimos años este desarrollo en la búsqueda de soluciones más sostenibles e innovadoras ha llegado a jugar un papel predominante en el crecimiento económico global, también se ha manifestado como un factor de gran relevancia con respecto a los problemas ambientales (Chávez *et al.*, 2019; Godswill *et al.*, 2020; Babalola & Jegede, 2020;).

La dimensión y gravedad del problema de la producción de residuos industriales, trae consigo la necesidad urgente de definir una estrategia capaz de conducir a una gestión de residuos eficiente y eficaz. La gestión eficaz de los residuos en el proceso productivo conlleva una reducción de los costes de producción, además de reducir los problemas medioambientales, mejorar la calidad de vida y aumentar el confort medioambiental urbano (Ezeudu *et al.*, 2019; Awuchi *et al.*, 2020).

Con la competencia global en el mercado, es necesario que las empresas apuesten por la mejora de sus procesos productivos adoptando una producción personalizada, utilizando procesos más innovadores y versátiles, con tiempos de entrega cada vez más cortos y utilizando mínimos recursos, así como cumpliendo con las normas ambientales más estrictas, sin comprometer la calidad (Araújo *et al.*, 2021; Attaran, 2021; Ali & Xie, 2021; Narasimharaju *et al.*, 2022). Por otro lado, las empresas deben invertir en una reducción considerable de los niveles de consumo energético, en la reducción de desperdicios y residuos peligrosos, contribuyendo simultáneamente a la mejora de la imagen de las empresas, siendo el desarrollo de la actividad sostenible un objetivo de cualquier empresa. En respuesta, la Filosofía *Lean* y la Industria 4.0 pueden contribuir a estos desafíos (Kamble *et al.*, 2020; Mendes *et al.*, 2022).

La filosofía *Lean* tiene como objetivo eliminar el desperdicio y crear valor. A lo largo del tiempo ha ido mejorando el sistema de producción para mantenerse competitivo en el mercado, respondiendo rápidamente al cliente y brindando un producto totalmente confiable y seguro a un precio competitivo (Kamble *et al.*, 2020; Baumer-Cardoso *et al.*, 2020; Gebeyehu *et al.*, 2022; Sá *et al.*, 2022). Con la aparición de la Industria 4.0, se necesita un cambio de mentalidad, abierto a nuevas tecnologías que también contribuyan a la reducción de residuos. La Industria 4.0 aparece, así como una forma prometedora de abordar los desafíos futuros en el entorno productivo. La Industria 4.0 introduce nuevas formas de desarrollar productos inteligentes, introduciendo herramientas tecnológicas a través de las cuales se pueden promover los principios de la Filosofía *Lean*. Este nuevo enfoque podría integrarse con la filosofía *Lean* y podría tener importantes beneficios (Kamble *et al.*, 2020; Maracajá & Oliveira, 2020; Duarte *et al.*, 2021).

La aplicación conjunta de la Filosofía *Lean*, la industria 4.0 y la visión sostenible puede ayudar a las organizaciones a reducir o eliminar el desperdicio, mejorar métodos, procesos y productos. Todo ello utilizando una innovación sistemática siempre enfocada a reducir los impactos ambientales y maximizar el valor agregado acrecentado (Kamble *et al.*, 2020; Maracajá & Oliveira, 2020; Batinga & Borges, 2022). Debido a la gran necesidad de controlar y reducir los residuos generados por las distintas industrias, se propone un modelo que permita el control, caracterización, identificación y separación de estos.

Además de esta introducción, el artículo presenta una revisión de la literatura que presenta modelos existentes para el uso conjunto de la sostenibilidad, la filosofía *lean* y la industria 4.0. En secuencia presenta la propuesta metodológica y la aplicación del sistema de monitorización. Finalmente, conclusiones y referencias.

2. MODELOS EXISTENTES PARA EL USO CONJUNTO DE SUSTENTABILIDAD, FILOSOFÍA *LEAN* Y INDUSTRIA 4.0

La investigación bibliográfica reveló la existencia de 71 modelos más alineados con los objetivos trazados. La selección de estos tuvo como criterios: interacción de los conceptos Sustentabilidad, Filosofía *Lean* e Industria 4.0, mejora del índice de gestión ambiental, identificación, monitorización y control de los residuos producidos, mejora del desempeño productivo, facilidad de aplicación de los sistemas, fácil adaptación a las diversas dimensiones y tipos de industrias.

De acuerdo con los criterios anteriores y después de leer y analizar los distintos modelos, se seleccionaron los 4 que mejor se ajustan a los criterios y al sistema que se pretende desarrollar para realizar un análisis más detallado. Agrawal, & Paharia (2019) desarrollaron un modelo híbrido (figura 1) que combina la herramienta *Systematic Layout Planning* (SLP) y la simulación con el *software* ARENA (Agrawal & Paharia, 2019).

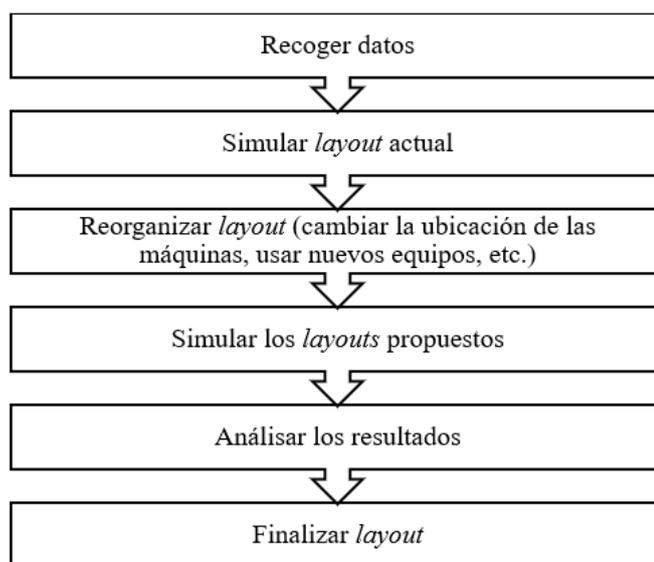


Figura 1: Metodología para mejorar la distribución de instalaciones industriales.

Fuente: Adaptado de Agrawal & Paharia (2019).

La Figura 1 muestra el diagrama de flujo del proceso de la metodología. El modelo, además de posibilitar la mejora del *layout* de las instalaciones industriales, también permite un análisis para que la elección sea la acertada y acorde a las necesidades de cada actividad o requerimientos (Agrawal & Paharia, 2019). En general, la selección del *layout* implica, en primer lugar, recoger datos, analizar y simular el diseño actual. A continuación, se utiliza un gráfico de relación de actividad. Después del análisis, el siguiente paso es reorganizar el *layout* y con la ayuda del *software* ARENA, verificar si la propuesta es más adecuada (Agrawal & Paharia, 2019).

La metodología que presentan Agrawal & Paharia (2019) aborda uno de los tres temas de interés, la Filosofía *Lean*. Este tiene como objetivo mejorar el rendimiento del sistema de producción mediante la reorganización del *layout*. La metodología híbrida ayuda a seleccionar el mejor *layout* en función del tipo de industria, material a manipular, entre otros criterios. Esta metodología ayuda a mejorar el desempeño de la producción a través de la reorganización del suelo de la fábrica. Sin embargo, para conseguir las mejoras, es necesario realizar varias simulaciones, siendo de gran importancia la fase inicial, en la que se realiza la recogida de información, siendo esta fase una de las más importantes. Las limitaciones físicas, económicas y prácticas de cada empresa pueden ser otra limitación a tener en cuenta.

La metodología propuesta por Agrawal & Paharia (2019) podría mejorarse con la introducción de los conceptos: Industria 4.0 y Sustentabilidad, ya que estos traen beneficios en varios niveles. La introducción de Industria 4.0 contribuirá para obtener un modelo virtual representativo de forma fácil, rápida y económica, así como ayudará en la reorganización del *layout*

convirtiéndolo en una propuesta de sistema versátil y fácil de usar. El concepto de Sustentabilidad, por otro lado, contribuirá a mejorar no solo el desempeño de la producción, sino que también permitirá una mejora en el desempeño ambiental de la empresa

Alshamasi *et al.* (2017) proponen un sistema de *Internet of Things* (IoT) para monitorizar la contaminación del aire, a través de la recogida de datos en tiempo real en ubicaciones específicas, como se muestra en la Figura 2 (Alshamasi *et al.*, 2017).

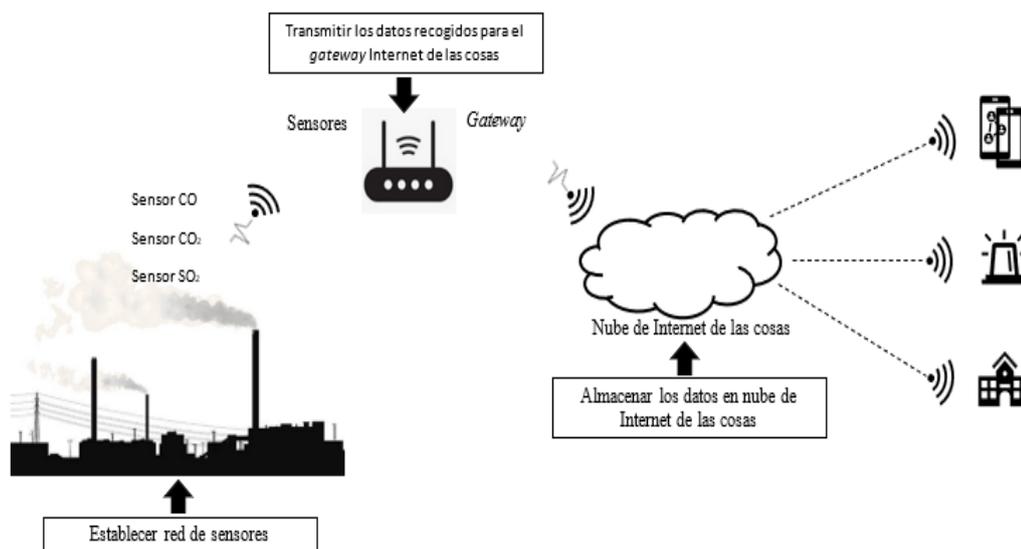


Figura 2: Modelo de monitoreo de gases contaminantes usando IoT.

Fuente: Adaptado de Alshamasi *et al.* (2017).

El sistema consta de sensores inalámbricos, microcontrolador, *gateway* y una plataforma IoT. La señal analógica de cada uno de los sensores se convierte en una señal digital, que a su vez se envía al microcontrolador. Este compara el valor medido con un valor umbral predeterminado. El resultado medido se envía al *gateway* IoT, que, a su vez, procesa y almacena los datos y los envía para la plataforma IoT. En esta plataforma, es posible ver datos, consultar alertas, entre otras aplicaciones que se pueden agregar (Alshamasi *et al.*, 2017).

Después de analizar los datos, y si el sistema detecta algún parámetro fuera de lo preestablecido, envía una alerta para que se tomen las medidas necesarias. Además de esta advertencia, si los valores de contaminación medidos alcanzan ciertos niveles considerados inapropiados, el sistema emite una alarma tomando varias acciones, con el fin de alertar a las personas (Alshamasi *et al.*, 2017).

La red del sistema inalámbrico cuenta con el microcontrolador Wasmote, ya que este es mejor para ambientes exteriores, porque tiene una vida útil más larga en comparación con otros similares. Permite varias combinaciones de comunicación como Zigbee y 802.15.4 y puede contener más sensores conectados. El sensor se conecta al microcontrolador, que se elige en función de lo que se pretende monitorizar. El *gateway* inalámbrico (Meshlium) recibe los datos y los almacena en una base de datos local y los envía a una base de datos en la nube. El *gateway* permite la comunicación en *Wi-Fi* 2.4 Ghz, XBee, entre otros, así como la comunicación con teléfonos inteligentes, ya que integra un módulo GPS (Alshamasi *et al.*, 2017).

Alshamasi *et al.* (2017) proponen un sistema que se puede adaptar e integrar fácilmente dentro de una industria, puede controlar mejor y alcanzar los límites legales vigentes para la contaminación del aire. La constitución del sistema, y el recurso de la plataforma IoT, permite su implementación de manera fácil y económica (Alshamasi *et al.*, 2017).

Dado que este trabajo se centra en tres conceptos: Filosofía *Lean*, Industria 4.0 y Sustentabilidad, el sistema propuesto aborda solo dos de los tres conceptos. La Filosofía *Lean*, en este sistema, contribuiría beneficiosamente, ya que esta Filosofía tiene en su génesis una cultura de reducción del consumo transversal en la empresa, contribuyendo a la reducción de residuos, así como a la reducción de la generación de contaminantes, contribuyendo beneficiosamente al medio

ambiente (Alshamasi *et al.*, 2017; Batinga & Borges, 2022). Si bien el sistema está diseñado para ser robusto, para soportar las más variadas condiciones climáticas se debe tener en cuenta que para que el sistema sea de bajo coste, depende directamente de los componentes que se utilicen en él, es decir, la conexión entre los diversos dispositivos puede ser uno de los desafíos y, con ello, se puede influir en el valor de la implementación del sistema.

Fatimah *et al.* (2020) desarrollaron un sistema de gestión de residuos basado en la economía circular (figura 3). Este puede separar los residuos municipales, identificar sus características y determinar tecnologías de tratamiento de residuos sustentables mediante el uso de IoT (Fatimah *et al.*, 2020).

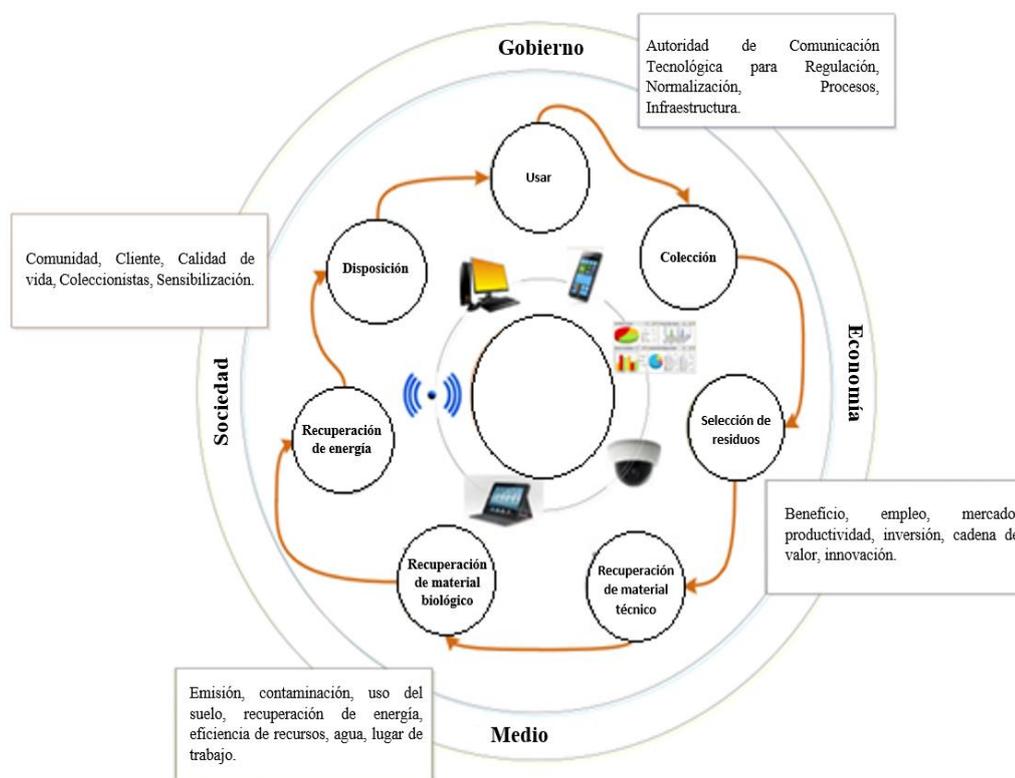


Figura 3: Estructura fundamental del Sistema de Gestión de Residuos Inteligente y Sostenible.

Fuente: Adaptado de Fatimah *et al.* (2020).

Como se muestra en la Figura 3, los autores presentan un sistema inteligente de gestión de residuos, que fue desarrollado para mejorar la gestión de los residuos municipales de los residuos de tiendas, hoteles y hogares (Fatimah *et al.*, 2020).

El sistema presentado permite la separación de residuos de acuerdo con la secuencia de flujo de residuos en el sistema de gestión de residuos, separándolos en función de algunas características, como tamaño, metal y no metal, ligero, inerte y combustible. Este sistema también permite agrupar el residuo y tomar decisiones sobre la tecnología de tratamiento adecuada (Fatimah *et al.*, 2020).

Todo el proceso comienza con la recogida de los residuos municipales producidos por la ciudad, los cuales son enviados al centro de recogida de residuos de la ciudad mediante un camión compactador, debidamente identificado por un código de barras. Esto identifica el camión, la empresa responsable del mismo, el tipo de residuo, su origen y su peligro. Una vez que el camión llega al centro de recogida de residuos, un sensor recoge los datos leyendo el código de barras vinculado al transportador y envía la información a la base de datos. Luego, el camión se pesa mediante una báscula, que también está conectada a la base de datos del centro de recoja a través de la red local. Después del camión ser pesado, este vierte los residuos en el área correspondiente, que también está conectada al sistema. Luego, una máquina mecánica transporta los residuos a la plataforma de clasificación manual, mediante cintas transportadoras hasta la zona de clasificación, donde se separan los residuos según especificaciones. Una vez finalizada la primera clasificación, la

basura pasa a una segunda clasificación. En esta etapa, la identificación de los residuos es a través de sensores, en los que se realiza una nueva separación y se envían los residuos según sus características. Posteriormente, los residuos se distribuyen según su futuro uso, como es el caso del plástico recogido, ya que este se puede convertir en ladrillos. La basura restante sin interés o posibilidad de reutilización se contabiliza y se envía a un vertedero (Fatimah *et al.*, 2020).

Toda la información recopilada en las distintas etapas del proceso se reenvía a la base de datos. Después de recibir y procesar los datos y en función de las características de los residuos, el sistema proporcionará una posible tecnología de tratamiento, de acuerdo con las existentes en el centro, a través de un *touchscreen*, *dashboard*, *smartphone*, ordenador u otro dispositivo conectado al sistema (Fatimah *et al.*, 2020).

El sistema propuesto por Fatimah *et al.* (2020) involucra dos de los tres conceptos de interés para el trabajo, Sustentabilidad e Industria 4.0, presenta algunas ventajas como la percepción del nivel de desarrollo tanto a nivel social como económico de la gestión de residuos, además de permitir la creación de indicadores que pueden ayudar a visualizar el desempeño de la gestión ambiental. El sistema es fácilmente adaptable a otras áreas como la monitorización de parámetros debido a sus características. Otra ventaja radica en el núcleo del sistema, ya que cuenta con *Information and Communication Technology* (ICT). Mediante el uso de ICT en tiempo real, se puede lograr una gestión de residuos inteligente, flexible y confiable e información relevante, así como la mejora de los aspectos económicos, sociales y ambientales.

La combinación de ICT con IoT ofrece un enfoque de nueva generación, para mejorar el sistema global de gestión de residuos de manera eficiente y eficaz que permite transformar características de residuos grandes y complejos en valiosos recursos materiales y energéticos al integrar nuevas tecnologías y su uso ya es una realidad en el área donde se pretende implementar.

El sistema, a pesar de ser versátil y fácil de aplicar, tiene algunas limitaciones, siendo la seguridad del sistema una de ellas, y es necesario mejorarlo para que sea más seguro.

Aunque el sistema aborda dos de los tres temas en estudio, este no aborda la Filosofía *Lean*. La introducción de esta metodología sería una ventaja ya que el primer cribado se realiza de forma manual, el uso de algunas metodologías que ofrece la Filosofía *Lean* mejoraría el desempeño de esta fase.

Otra limitación tiene que ver con la cantidad de parámetros a analizar, que pueden hacer que el sistema sea más lento e incluso perder calidad a la hora de recoger los datos, siendo importante determinar los parámetros más importantes a analizar. Además de la gran cantidad de parámetros a analizar que hacen que el sistema pierda calidad y velocidad, la distancia entre los distintos dispositivos que componen el sistema puede ocasionar algunas limitaciones, y la distancia entre ellos es un problema por superar. Otra limitación es el coste de implementación del sistema. Marques *et al.* (2019), desarrollaron un sistema de gestión de residuos para ciudades inteligentes basado en IoT multinivel. El sistema desarrollado está compuesto por cuatro capas y reúne los conceptos de *Cyber Physical Systems* (CPS), un sistema de comunicación avanzado e inteligente como se muestra en la Figura 4. Fue concebido y organizado en cuatro capas: Objetivos Físicos, Comunicación, plataforma *Cloud* y Servicios (Marques *et al.*, 2019).

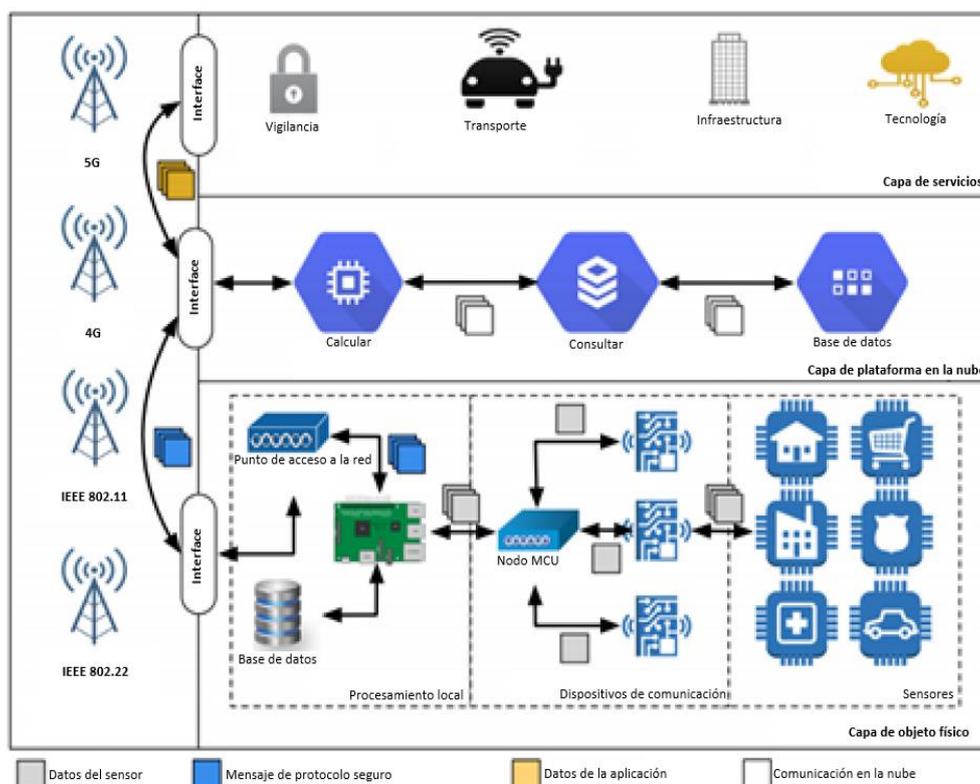


Figura 4: Sistema de monitoreo basado en IoT multinivel.

Fuente: Adaptado de Marques *et al.* (2019).

La primera capa permite recoger datos a través de sensores de IoT, que a su vez proporcionarán a la ciudad información y servicios diversos. Una vez que los sensores recopilan los datos, se utiliza un dispositivo de comunicación como la *Radio Frequency IDentification* (RFID), *Bluetooth* y *ZigBee* para recibir los mismos datos. Estos se procesan a través del *Nodo MCU*, que se comunica con una unidad de procesamiento local, y esto permite la visualización de la información por parte de la aplicación que ofrece el servicio. Para posibilitar la incorporación de aplicaciones específicas, el sistema facilita el acceso a una plataforma en la nube que se encarga del motor informático y el servicio de almacenamiento de datos (Marques *et al.*, 2019).

Para tener compatibilidad y lidiar con varios tipos de tecnologías de acceso a la red, el sistema presenta una capa de comunicación, siendo la segunda del sistema, y lleva a cabo la implementación de diversas tecnologías inalámbricas, además de proporcionar comunicación entre todas las capas (Marques *et al.*, 2019).

La tercera capa, plataforma en la nube, diseñada para ofrecer tres tipos de servicios: procesamiento, base de datos y almacenamiento de datos. Cada uno de estos se puede asignar dinámicamente para cumplir con los requisitos de diferentes tipos de aplicaciones. Para lidiar con la confidencialidad, el sistema admite diferentes protocolos seguros *Secure Hypertext Transport Protocol* (HTTPS) (Marques *et al.*, 2019).

Las aplicaciones proporcionadas por el sistema se encuentran en el cuarto y último nivel, servicios. Esta capa se subdivide en cuatro grupos: Vigilancia, Transporte y Logística, Infraestructura y Tecnología, en los que cada grupo ofrece un determinado tipo de servicio (Marques *et al.*, 2019).

El sistema propuesto por Marques *et al.* (2019), al igual que el anterior, aborda los temas de Sustentabilidad e Industria 4.0, es fácil de aplicar y adaptar, pudiendo aplicarse en las más variadas industrias y aplicaciones. Puede interactuar con varios tipos de dispositivos, debido a los diversos protocolos que se pueden asociar con la capa de comunicación, lo que permite comunicarse con elementos internos y externos en función del tipo de servicio que se pone a disposición. Sin embargo, tiene algunas limitaciones, en cuanto a la distancia entre los distintos componentes que componen el sistema, ya que cuanto mayor es la distancia entre ellos, menor es la cantidad y calidad

de los datos recogidos. Este sistema si se compara con el anterior en cuanto a seguridad, es mejor. A pesar de esta mejora, el sistema, dependiendo del protocolo elegido, tendrá una variación en la cantidad de usuarios que pueden acceder al sistema simultáneamente, comprometiendo de alguna manera su rendimiento.

3. MODELO PARA MONITORIZAR, CLASIFICAR Y RECOGER RESIDUOS INDUSTRIALES - *LEAN* E INDUSTRIA 4.0

3.1 Propuesta Metodológica

Si bien existe un creciente interés en torno a los conceptos: Sustentabilidad, Filosofía *Lean* e Industria 4.0, los sistemas propuestos para la monitorización de los residuos se utilizan mayoritariamente en el sistema de gestión de residuos municipales y en la monitorización de emisiones, no se explora la posibilidad de utilizar este tipo de sistema en el entorno industrial. Con la implantación de un sistema de monitorización y estos tres conceptos en el entorno industrial, se permite un mayor control y percepción de los residuos generados, lo que ayudará a adecuar mejor las leyes vigentes, tanto a nivel nacional como internacional.

Los sistemas de monitorización y mejora de la gestión ambiental abordan mayoritariamente dos de los tres conceptos objeto de estudio en este trabajo. El sistema de monitorización de residuos presentado en este trabajo se basa en el sistema propuesto por Marques *et al.* (2019), ya que este tiene una gran flexibilidad y con ello la posibilidad de adaptarse al sistema que se pretenda desarrollar. Teniendo en cuenta el objetivo de este trabajo, el sistema propuesto se basará en la interacción de los conceptos de Industria 4.0 y Sustentabilidad.

Una alternativa para mejorar la sustentabilidad es la introducción de nuevas tecnologías, especialmente las de la Industria 4.0, un alto nivel de conectividad entre procesos favorece la expansión de productos personalizados y otros elementos que sugieren cambios profundos en los entornos organizacionales y la sociedad, contribuyendo al programa de sustentabilidad.

En cuanto a la Filosofía *Lean*, esta tiene en su génesis una cultura de reducción de consumos transversales en la empresa, lo que hace que esta práctica aunque no se aplique con el propósito de reducir el consumo de recursos naturales, residuos, emisiones, la empresa está contribuyendo indirectamente a que su sistema productivo sea más sustentable, contribuyendo a una mejor gestión medioambiental, reducción de residuos, desperdicios, emisiones, aunque se pueda reducir, pero tiene cierta visibilidad si se compara con otra empresa que no se basa en esta filosofía.

Por lo tanto, las prácticas *Lean* también ofrecen la oportunidad de adoptar iniciativas más sustentables, con el resultado final de mejorar también el desempeño ambiental y de producción.

Las estrategias de gestión ambiental que alinean sus objetivos con los de la Filosofía *Lean* pueden incrementar el nivel de efectividad del sistema productivo, pues a través de la visión holística que tienen las empresas, es posible contribuir a reducir el desperdicio y aumentar la productividad. En este sentido, el énfasis de la Filosofía *Lean* en la reducción de residuos favorece la reducción del impacto ambiental de los sistemas productivos ya que esto tiene una relación positiva con el concepto de sustentabilidad.

Dadas las demandas sociales, económicas y medioambientales, los temas: Sustentabilidad, Filosofía *Lean* e Industria 4.0, son de gran importancia. Sin embargo, para que la empresa logre más fácilmente una excelente gestión ambiental, la Filosofía *Lean* y la Industria 4.0 contribuyen sustancialmente a que esto suceda, ya que estos conceptos pueden contribuir significativamente a incrementar la sustentabilidad.

El sistema desarrollado fue diseñado para que pueda ser implementado en el suelo de fábrica con el fin de contribuir al control, identificación, cuantificación y separación de los residuos desde la etapa inicial, hasta su envío a una empresa certificada, para tal fin ya sea para su reciclaje, o para otro propósito. En la construcción del sistema, como se muestra en la figura 5, se tuvo en cuenta la gran diversidad de residuos producidos por las más variadas áreas industriales, brindando flexibilidad de aplicación en el contexto de pequeñas, medianas y grandes empresas.

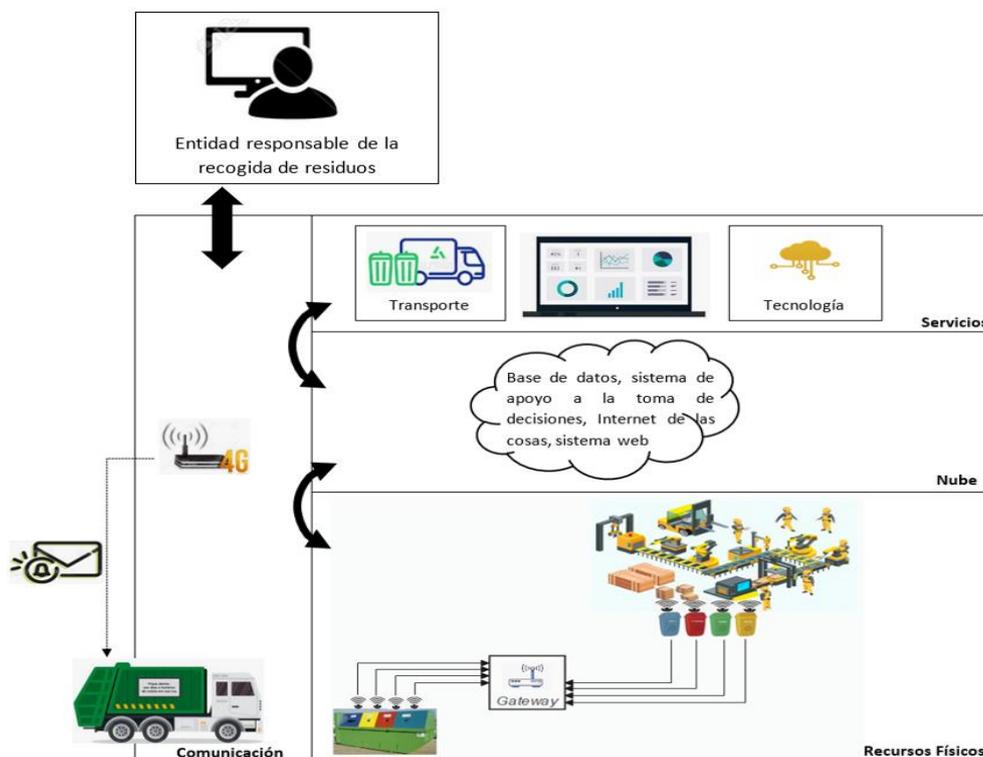


Figura 5: Metodología para el monitoreo en tiempo real de residuos industriales

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5, se puede ver el sistema desarrollado. Este fue diseñado para la monitorización los residuos industriales, para que exista un mayor control sobre los residuos producidos, así como su identificación, cuantificación y separación desde la etapa inicial, hasta que son recogidos y encaminados por una empresa certificada y competente. El sistema de monitorización desarrollado como se muestra en la figura anterior se compone de cuatro capas: Recursos físicos, Comunicación, Nube y Servicios.

La primera capa, Recursos Físicos, consta de sensores, cubos y contenedores de basura, *gateway*, ordenadores, entre otros dispositivos, ya sean fijos o móviles. La segunda capa, Comunicación, permite la conexión entre las capas restantes y los dispositivos que se agregan al sistema. La tercera capa, la nube, comprende el sistema de procesamiento y almacenamiento de datos. Un servicio gratuito de IoT permite el almacenamiento, el análisis y la visualización de datos en tiempo real. La cuarta y última capa, Servicios, a través del servicio gratuito de IoT, permite la eliminación o mejora de nuevos servicios que puedan estar disponibles, como el transporte, análisis y visualización de diversos parámetros como el índice de gestión ambiental a través de varios dispositivos conectados al sistema.

El sistema propuesto también se sustenta en la reorganización de los *layouts*, para adecuarse al área disponible, dimensiones de la materia prima, áreas de almacenamiento de esta y productos terminados, entre otros factores.

3.2 Descripción del funcionamiento

Como se mencionó, el sistema de monitorización de residuos fue diseñado para ser implementado en el suelo de fábrica, y esto permitirá controlar todos los residuos que se producen tanto en la línea de producción como en otras actividades que también son importantes para que la fábrica funcione correctamente.

Como se muestra en las figuras 6 y 7 para tener una mejor gestión de los residuos producidos, los operadores tienen un papel fundamental en el método propuesto. Estos, en una primera etapa, y después de detectar una pieza y / o componente que no está de acuerdo con lo especificado, tienen que determinar si pasará a refabricación o reciclaje, colocándolo en la caja

respectiva. Por otro lado, en lo que respecta a otras actividades internas, como la sustitución de refrigerante, aceite, etc., estos dan lugar a desperdicios. Estos deben ser distribuidos y empaquetados en tanques específicos (ejemplo: aceite usado, refrigerante, agua contaminada), cubos de basura, contenedores (ejemplo: metales, plásticos, indiferenciados, otros materiales) para poder reenviarlos y ser reciclados.

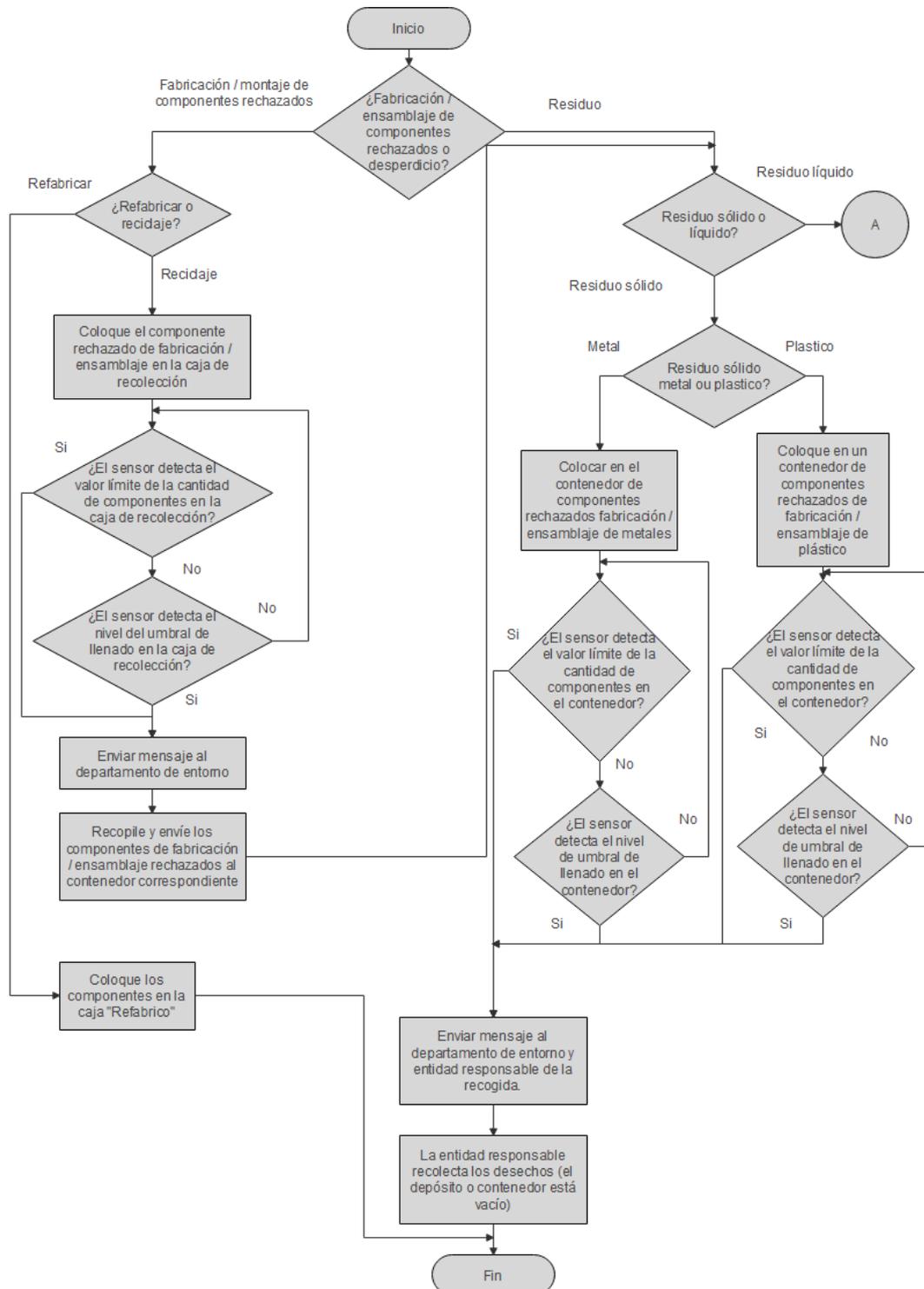


Figura 6: Diagrama de flujo del proceso de monitorización de residuos propuesto.

Fuente: Elaboración propia.

Para permitir una clasificación más eficiente y eficaz de los residuos sólidos producidos, se identifica mediante una cámara. El sistema, después de identificar el residuo, además de proporcionar información sobre el contenedor donde se depositará, también muestra las diversas

posibilidades que tiene para ser reciclado. La monitorización de los residuos es posible a través de sensores que se colocan en contenedores, cubos de basura y depósitos. La clasificación de los residuos se realiza mediante una cámara. Los sensores tienen como objetivo recoger datos como el peso y el nivel asociados con el contenedor, depósito, etc. y la cámara para identificar los residuos sólidos producidos, que a su vez envía los datos al *gateway*.

El *gateway* recibe y almacena los datos, y también tiene la función de interactuar con la tercera capa, la nube. Esta permite el procesamiento y almacenamiento de datos recopilados por los sensores y la cámara. A través del servicio gratuito de IoT, ThingSpeak, con recurso a dispositivos móviles o fijos conectados al sistema, es posible acceder a la cuarta capa, Servicios. Los Servicios permiten el análisis y visualización de datos, pero además si el sistema detecta algún parámetro fuera del preestablecido envía una alerta para que sea posible tomar las medidas necesarias. Otra aplicación disponible en la capa Servicios es el transporte. Esta aplicación es automática y permite emitir una alarma a la entidad responsable de la recogida de residuos en cuanto los contenedores alcanzan un determinado nivel.

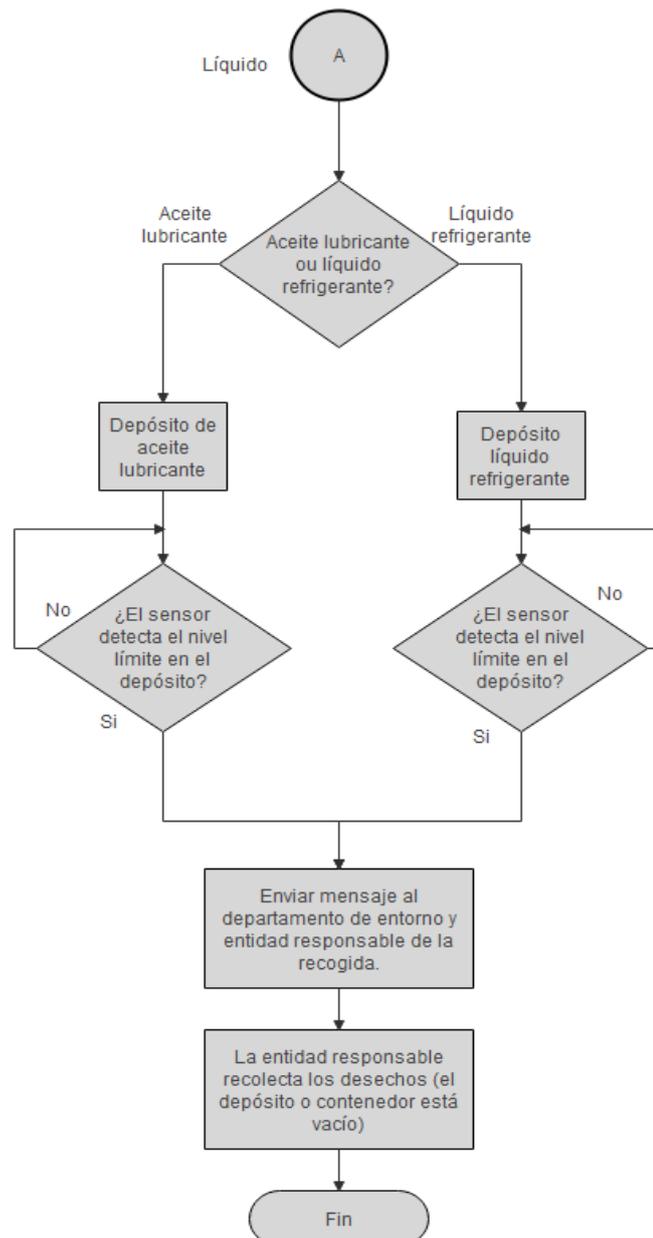


Figura 7: Diagrama de flujo del proceso de monitorización de residuos propuesto.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Discusión de los resultados

Ante una globalización creciente y volátil de los mercados, con una sociedad cada vez más exigente que sigue las tendencias y otros fenómenos de los mercados, las empresas deben tener una gran capacidad de respuesta para satisfacer a sus clientes, lo que en ocasiones conduce a una mala gestión de los residuos industriales.

La revisión bibliográfica muestra que se busca encontrar soluciones para mejorar la gestión de los residuos municipales e industriales, comenzando por su recogida, encaminamiento, separación y reciclaje. Los artículos analizados para mejorar la gestión de residuos como se mencionó anteriormente combinan los conceptos: Sustentabilidad e Industria 4.0, y son más apropiados para recoger residuos municipales, y análisis de la calidad del aire.

El modelo desarrollado, comparado con los analizados anteriormente, es un activo para las empresas, ya que, al combinar los tres conceptos objetivo del estudio, les permitirá mejorar considerablemente su desempeño ambiental, gracias al aporte positivo que la Filosofía *Lean* e Industria 4.0 tiene con el concepto de Sustentabilidad. La Filosofía *Lean* contribuye para lograr la mejora continua en los procesos productivos y la eliminación o reducción de desperdicios, mientras que la Industria 4.0, debido a las nuevas tecnologías que ofrece a las empresas, les permite encontrar nuevas formas de controlar y monitorizar todo su proceso. producción y residuos industriales, así como crear una nueva perspectiva en cuanto al desarrollo del producto, generando mayor valor en este producto y oportunidades para llevar a cabo ciclos de vida del producto que pueden incluir todo su ciclo de vida, incluyendo también el reciclaje. Esta conexión entre todos los intervinientes permite la coordinación eficiente del producto, material, energía y agua a lo largo del ciclo de vida del producto, así como en las diferentes áreas y fases de producción.

El modelo presentado, como los anteriores, es de coste reducido, fácil de aplicar y flexible, lo que le confiere versatilidad de aplicación, pudiendo ser aplicado en pequeñas, medianas y grandes empresas, así como en las más variadas áreas industriales. Esto a pesar de haber sido desarrollado para monitorizar, clasificar y recoger residuos industriales en tiempo real, por su flexibilidad se puede adaptar para la monitorización de la calidad del aire, agua, suelo, entre otros parámetros igualmente importantes como la humedad y la temperatura.

Además, el sistema permitirá a las empresas mejorar considerablemente el desempeño del sistema de producción, eliminando o reduciendo residuos, índices de gestión ambiental y otros indicadores *Lean*.

Si bien el sistema propuesto es un activo para las empresas, tiene algunas limitaciones en cuanto a la elección de los dispositivos que lo integran, ya que el coste dependerá de estos. Otra limitación tiene que ver con la distancia entre los distintos dispositivos, cuanto mayor sea la distancia entre ellos, peor será la calidad en la recogida y envío de los parámetros a analizar. Esta situación se puede solucionar eligiendo dispositivos que tengan un mayor alcance de comunicación o cambiando el protocolo de comunicación.

4. CONCLUSIÓN

La industria ha pasado por varias evoluciones para adaptarse a la creciente competitividad dictada por la globalización del mercado, para cumplir con las leyes ambientales y los clientes que buscan productos personalizados. Dados los constantes cambios y el enfoque en la satisfacción de los clientes, el avance de los problemas ambientales a lo largo del tiempo se ha hecho evidente. Así, debido a la dimensión y gravedad del problema de la producción de residuos industriales tanto para el medio ambiente como para los alrededores y para los seres vivos, se crearon nuevas leyes y metas de sustentabilidad, haciendo que las empresas busquen nuevas formas de gestión de los sistemas productivos y de los residuos generados.

Así, y dada la problemática, es evidente que existe la necesidad de mejorar la eficiencia de los sistemas de producción, el uso de materias primas, recursos naturales, energía, transporte, pero también que existe un mayor control de los residuos industriales producidos. Dada la brecha existente, se desarrolló un modelo que combina los tres conceptos a los que apunta el estudio de esta obra, que permite la monitorización, clasificación y recogida de residuos industriales en tiempo real.

El modelo desarrollado está compuesto por sensores de peso y nivel, y cámaras que recogen información relevante, como la cantidad y características de los residuos, que a su vez son enviados para el *gateway*. Este, a su vez, envía los datos a la nube, donde los datos se almacenan y procesan utilizando los servicios que están asociados a ella. Los servicios están contenidos en una aplicación ThingSpeak, un servicio gratuito de IoT, que permite la agregación y eliminación de servicios, y la visualización en tiempo real de diversos indicadores de gestión ambiental, así como de procesos productivos.

La implementación del modelo promueve un cambio en las políticas de sustentabilidad de las empresas, ya que ayuda a controlar de manera eficiente y efectiva los residuos producidos, ayudándolas a cumplir con la normativa del país donde operan e internacionalmente. El modelo propuesto, además de contribuir al cumplimiento de las leyes vigentes, permite una mejor percepción de los residuos producidos, incluyendo su caracterización, promoviendo el envío de estos a las entidades responsables y componentes para su recogida y reciclaje, resaltando un cambio en las políticas de la empresa. por su compromiso con la separación, cuantificación, caracterización y envío responsable de los residuos industriales producidos.

Si bien el modelo presentado es de bajo coste, flexible y fácil de aplicar en cualquier área industrial, tiene algunas limitaciones, una de ellas es el rango de comunicación entre los distintos dispositivos que componen el sistema de monitorización. Otra limitación tiene que ver con el caso de agregar sensores para medir la calidad del aire o el ruido, ya que requiere una adaptación en el protocolo de comunicación, teniendo la necesidad de contar con una red de comunicación externa, lo que conllevará un aumento de costes. El coste inherente a la reorganización del *layout* puede ser limitante, ya que depende del tipo, las características, el tamaño de la empresa y la flexibilidad de su sistema de producción existente.

5. AGRADECIMIENTOS

El autor de la FCT NOVA agradece a la Fundación para la Ciencia y la Tecnología (FCT-MCTES) el apoyo brindado al trabajo de investigación a través del Proyecto UIDB / 00667/2020 (UNIDEMI).

6. REFERENCIAS

- Agrawal, K & Paharia, A. (2019). Layout optimization of machining process of the side frame of cotton ginning M/C using FLP. *International Journal of Advance Research and Development*, 3(4), 260-265.
- Ali, S., & Xie, Y. (2021). The impact of Industry 4.0 on organizational performance: the case of Pakistan's retail industry. *European Journal of Management Studies*. <https://doi.org/10.1108/EJMS-01-2021-0009>
- Alshamsi, A., Anwar, Y., Almulla, M., Aldohoori, M., Hamad, N. & Awad, M. (2017). Monitoring Pollution: Applying IoT to Create a Smart Environment. *International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICECTA.2017.8251998>
- Araújo, N., Pacheco, V., & Costa, L. (2021). Smart Additive Manufacturing: The Path to the Digital Value Chain. *Technologies*, 9(4), 88. <https://doi.org/10.3390/technologies9040088>

- Attaran, M. (2021). The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02521-x>
- Awuchi, C., Twinomuhwezi, H., Awuchi, C. & Ikechukwu, A. (2020). Industrial Waste Management, Treatment, and Health Issues: Wastewater, sold and Electronic Wastes. *European Academic Research*, 8, 1081-1119.
- Babalola, F. D. & Jegede, E. B., 2020. Participation of stakeholders in sustainable management of a state-owned forest reserve in kwara state, Nigeria. *Revista Produção e Desenvolvimento*, Rio de Janeiro, 6, e504, 1-11. <https://doi.org/10.32358/rpd.2020.v6.504>
- Batinga, G. L., & Borges, R. C. (2022). Ambiguities of industry 4.0: gains, efficiency, and worker tensions. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 8(1), e595. <https://doi.org/10.32358/rpd.2022.v8.595>
- Baumer-Cardoso, M. I., Campos, L. M. S., Santos, P. P. P. & Frazzon, E. (2020). Simulation-based analysis of catalyzers and tradeoff in Lean & Green manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 242, 118411. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118411>
- Chávez, P. J., Ruggeri, E., Martini, I. & Discoli, C. (2019). Factores clave en la implementación de políticas energéticas en Italia. *Revista de Produção e Desenvolvimento*, 5, e384, 1-21. <https://doi.org/10.32358/rpd.2019.v5.384>
- Duarte, K. da S., Lima, T. A. da C., Alves, L. R., Rios, P. A. do P., & Motta, W. H. (2021). The circular economy approach for reducing food waste: a systematic review. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 7. <https://doi.org/10.32358/rpd.2021.v7.572>
- Ezeudu, O. B., Agunwamba, J. C., Ezeasor, I. C., & Madu, C. N. (2019). Sustainable production and consumption of paper and paper products in Nigeria: A review. *Resources*, 8(1), 53. <https://doi.org/10.3390/resources8010053>
- Fatimah, Y. A., Govindan, K., Murniningsih, R. & Setiawan, A. (2020). Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: A case study of Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122263>
- Gebeyehu, S. G., Abebe, M., & Gochel, A. (2022). Production lead time improvement through lean manufacturing. *Cogent Engineering*, 9(1), 2034255. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2034255>
- Godswill, A. C., Gospel, A. C., Otuosorochi, A. I., & Somtochukwu, I. V. (2020). Industrial and community waste management: global perspective. *American Journal of Physical Sciences*, 1(1), 1-16. <https://doi.org/10.47604/ijf.1024>
- Kamble, S., Gunasekaran, A. & Dhone, N. C. (2020). Industry 4.0 and Lean manufacturing practices for sustainable organizational performance in Indian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1319-1337. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630772>
- Maracajá, K F. B. & Oliveira, B. R. S. (2020). Indústria 4.0 e sustentabilidade: um estudo de caso sobre o processo de reciclagem de paletes de uma grande empresa em Campina Grande-PB. *Qualitas Revista Eletrônica*, 21(2). <https://doi.org/10.18391/req.v21i2.5624>
- Marques, P., Manfroi, D., Deitos, E., Cegoni, J., Castilhos, R., Rochol, J., Pignaton, E. & Kunst, R. (2019). An IoT-based smart cities infrastructure architecture applied to a waste management scenario. *Ad Hoc Networks*, 87, 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.12.009>
- Mendes, D. S. F. T., Navas, H. V. G., & Charrua-Santos, F. M. B. (2022). Proposal for a maintenance management system based on the lean philosophy and industry 4.0. *Revista Produção E Desenvolvimento*, 8(1), e587. <https://doi.org/10.32358/rpd.2022.v8.587>
- Narasimharaju, S. R., Zeng, W., See, T. L., Zhu, Z., Scott, P., Jiang, X., & Lou, S. (2022). A comprehensive review on laser powder bed fusion of steels: Processing, microstructure, defects and control methods, mechanical properties, current challenges and future trends. *Journal of Manufacturing Processes*, 75, 375-414. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.033>
- Sá, J. C., Vaz, S., Carvalho, O., Lima, V., Morgado, L., Fonseca, L., ... & Santos, G. (2022). A model of integration ISO 9001 with Lean six sigma and main benefits achieved. *Total Quality Management & Business Excellence*, 33(1-2), 218-242. <https://doi.org/10.1080/14783363.2020.1829969>

DECLARATION OF CONTRIBUTIONS TO THE ARTICLE - CRediT

ROLE	ETerradillos	HNavas	FCharrua-Santos
Conceptualization – Ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims.	40%	30%	30%
Data curation – Management activities to annotate (produce metadata), scrub data and maintain research data (including software code, where it is necessary for interpreting the data itself) for initial use and later re-use.	80%	10%	10%
Formal analysis – Application of statistical, mathematical, computational, or other formal techniques to analyze or synthesize study data.	80%	10%	10%
Funding acquisition - Acquisition of the financial support for the project leading to this publication.	-	-	-
Investigation – Conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, or data/evidence collection.	60%	20%	20%
Methodology – Development or design of methodology; creation of models.	50%	25%	25%
Project administration – Management and coordination responsibility for the research activity planning and execution.	20%	40%	40%
Resources – Provision of study materials, reagents, materials, patients, laboratory samples, animals, instrumentation, computing resources, or other analysis tools.	80%	10%	10%
Software – Programming, software development; designing computer programs; implementation of the computer code and supporting algorithms; testing of existing code components.	-	-	-
Supervision – Oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team.	20%	40%	40%
Validation – Verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication/reproducibility of results/experiments and other research outputs.	50%	25%	25%
Visualization – Preparation, creation and/or presentation of the published work, specifically visualization/data presentation.	80%	10%	10%
Writing – original draft – Preparation, creation and/or presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).	80%	10%	10%
Writing – review & editing – Preparation, creation and/or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.	80%	10%	10%