

La gestión del mantenimiento: Una mirada desde las actuales perspectivas tecnológicas

Maintenance management: A look from current technological perspectives

Amilkar Ávila Atencio¹ (amilkar@ltu.thaba.cu) (<https://orcid.org/0000-0003-2109-6542>)

Eduardo León Parra² (eduardolp@ult.edu.cu) (<https://orcid.org/0000-0001-8843-6025>)

Ailen Estevez Torres³ (ailenet@ult.edu.cu) (<https://orcid.org/0000-0002-4337-0250>)

Resumen

La gestión del mantenimiento constituye un aspecto de gran valor a tener en cuenta en el desarrollo de la industria, que ha sido objeto de estudio desde la antigüedad hasta la actualidad. El desarrollo de la informática y las comunicaciones ha impuesto nuevos retos para su aplicación en los procesos vinculados a la gestión del mantenimiento, sin embargo, se requiere una actualización continua de sus políticas a partir de las normas jurídicas que se establecen. En tal sentido, esta investigación ofrece un estudio bibliográfico de diferentes fuentes, pertenecientes a autores nacionales e internacionales, que profundizan en la gestión del mantenimiento, pero que demanda de nuevas miradas desde su sistematización. Se persigue como objetivo analizar las principales tendencias internacionales referidas a la gestión del mantenimiento. Para ello se emplearon métodos del nivel teórico como el histórico lógico que permite comprender la gestión del mantenimiento en su desarrollo, su historia y su lógica mediante el conocimiento de sus distintas etapas en su sucesión cronológica; su evolución y desarrollo; principales rasgos, desenvolvimiento y conexiones históricas fundamentales. Además, se empleó el análisis y síntesis para encauzar el objeto de la investigación y sus principales resultados. Como conclusión se pudo identificar que el paradigma de la referida gestión evoluciona constantemente y sus tradicionales prácticas están siendo desplazadas hacia un mantenimiento predictivo donde impera la necesidad de actuar en base a la necesidad y no en base a un calendario.

Palabras clave: mantenimiento, gestión del mantenimiento, gemelo digital.

Abstract

Maintenance management is an aspect of great value to be taken into account in the development of industry, which has been the subject of study from ancient times to the present. The development of information technology and communications has imposed new challenges for its application in the processes linked to maintenance management, however, a continuous updating of its policies is required based on the legal norms that are established. In this sense, this research offers a bibliographic study of different sources, belonging to national and international authors, that deepen in the maintenance

¹ Máster en Ingeniería Industrial. Licenciado en Educación Primaria. Unidad Empresarial de Base 210 THABA. Las Tunas, Cuba.

² Máster en ciencias. Profesor Auxiliar. Universidad de Las Tunas, Cuba.

³ Máster en ciencias. Profesora Asistente. Universidad de Las Tunas, Cuba.

management, but that demands of new looks from its systematization. The objective is to analyze the main international trends referred to maintenance management. For this purpose, methods of the theoretical level were used, such as the historical logic that allows understanding maintenance management in its development, its history and its logic through the knowledge of its different stages in its chronological succession; its evolution and development; main features, development and fundamental historical connections. In addition, analysis and synthesis were used to channel the object of the research and its main results. As a conclusion, it was possible to identify that the paradigm of the referred management is constantly evolving and its traditional practices are being displaced towards a predictive maintenance in which.

Key word: maintenance, maintenance management, digital twin.

Introducción

La gestión del mantenimiento durante en su evolución histórica, ha estado marcada por continuos cambios debidos, principalmente, al enorme aumento en la nomenclatura y diversidad de los activos físicos que deben ser actualizados en todo el mundo, a la elaboración de diseños más complejos, al uso de nuevos métodos de mantenimiento y a la existencia de una óptica cambiante en la organización de esta actividad y sus responsabilidades (Alfonso, 2009; Rodríguez, 2012).

La gestión del mantenimiento y su análisis es una tarea compleja y de alta prioridad, teniendo en cuenta lo descrito en la norma ISO 55000:2014 sobre la gestión de activos y los criterios que se concretan en la NC ISO 9001: 2015 sobre el análisis de la infraestructura (como se citó en Marrero et al., 2019).

El objetivo de la presente investigación es analizar las principales tendencias internacionales referidas a la gestión del mantenimiento. Para ello se emplearon como métodos del nivel teórico: el histórico lógico, que permitió comprender la gestión del mantenimiento en su desarrollo, su historia y su lógica mediante el conocimiento de sus distintas etapas en su sucesión cronológica; su evolución y desarrollo; principales rasgos, su desenvolvimiento y las conexiones históricas fundamentales. Además, se empleó el análisis y síntesis para encauzar el desarrollo de la investigación y presentar sus principales resultados. Se aprovechó también, la consulta a expertos en el tema de gestión del mantenimiento para obtener su consenso en la importancia de este proceso desde la perspectiva de la investigación que se desarrolla y arribar a las principales conclusiones.

Desarrollo

El mantenimiento, como actividad, surge aparejada a la necesidad de reparar artículos sencillos y vitales para la subsistencia del hombre primitivo y ha evolucionado en la actualidad hasta nuevas filosofías o tendencias avanzadas como son los “*Digital Twins*” o gemelos digitales para la operación y mantenimiento de activos (figura 1).

Figura 1.

Generalidades sobre la actividad del mantenimiento.



Fuente: elaboración propia a partir de Alfonso, 2009; Rodríguez, 2012.

Importancia de la actividad de mantenimiento

Una correcta gestión del mantenimiento en una organización es fundamental (cuadro 1); en tanto se precisa de una necesaria relación entre: conservar los activos en óptimas condiciones para cumplir las funciones para las que fueron creados, con un máximo de fiabilidad y a costos competitivos y el mantenimiento de la entidad de servicio a la producción, lo que facilita alcanzar, en gran medida, una relación básica.

Cuadro 1.

Importancia de la actividad del mantenimiento



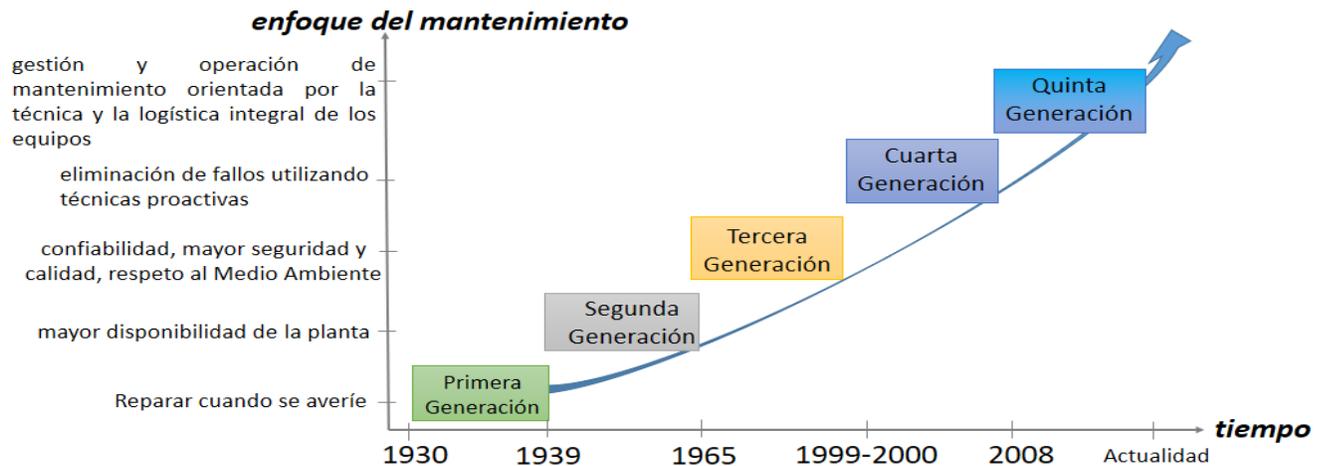
Fuente: elaboración propia a partir de Rodríguez, 2012.

Diversos son los autores que han definido el mantenimiento (Alfonso, 2009; Rodríguez, 2012). Según sus análisis, ajustados a la realidad histórico-concreta en la que se desempeñó la vida profesional de estos estudiosos del tema, a pesar de que varían mucho en su estructura, la mayoría coincide en la definición de su contenido relacionado con una serie de actividades o tareas que se organizan, planifican, ejecutan y controlan sobre un componente, equipo o sistema, para garantizar que se realicen las funciones para las que fue diseñado dentro de su contexto operacional.

Así, a nivel internacional, la evolución del mantenimiento, ha sido respuesta en gran medida a la evolución de los sistemas de producción, que han transitado de la producción en masa hasta la producción ajustada (*lean production*). La figura 2 sintetiza las principales etapas y enfoques del mantenimiento, declaradas en la bibliografía especializada.

Figura 2.

Evolución del mantenimiento.

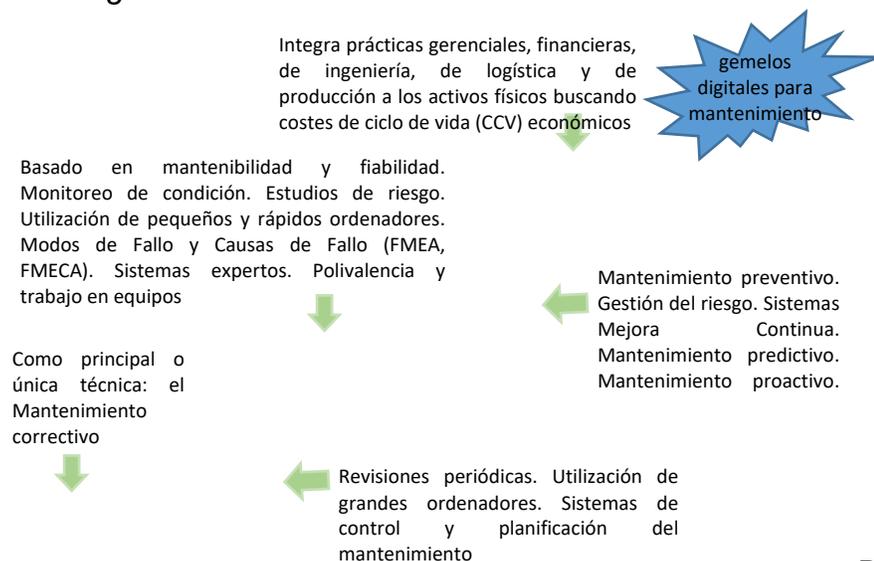


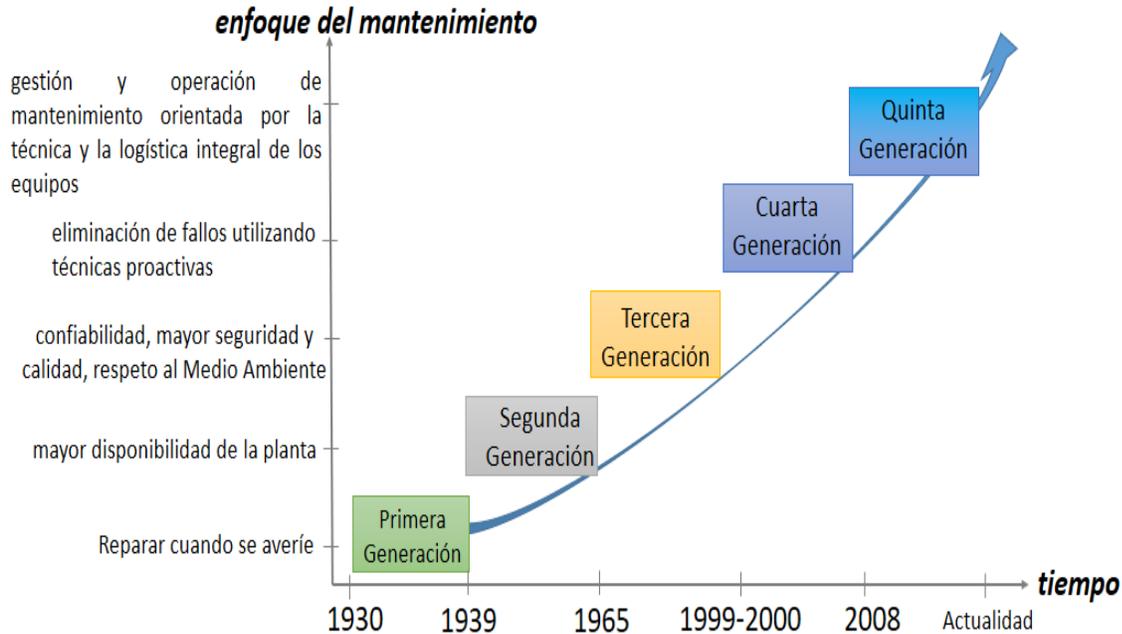
Fuente: elaboración propia a partir de Rodríguez, 2012.

Cada una de estas generaciones ha estado marcada por técnicas (figura 3) para llevar a cabo la gestión del mantenimiento, transitando desde el famoso “se rompe lo arreglo” hasta pronosticar, hibridar simulaciones en tiempo real con datos en tiempo real para obtener en un gemelo digital potente, para operación y mantenimiento, los posibles modos de fallo de sistemas complejos.

Figura 3.

Técnicas para llevar a cabo la gestión del mantenimiento.





Fuente: elaboración propia a partir de Alfonso, 2009; Rodríguez, 2012.

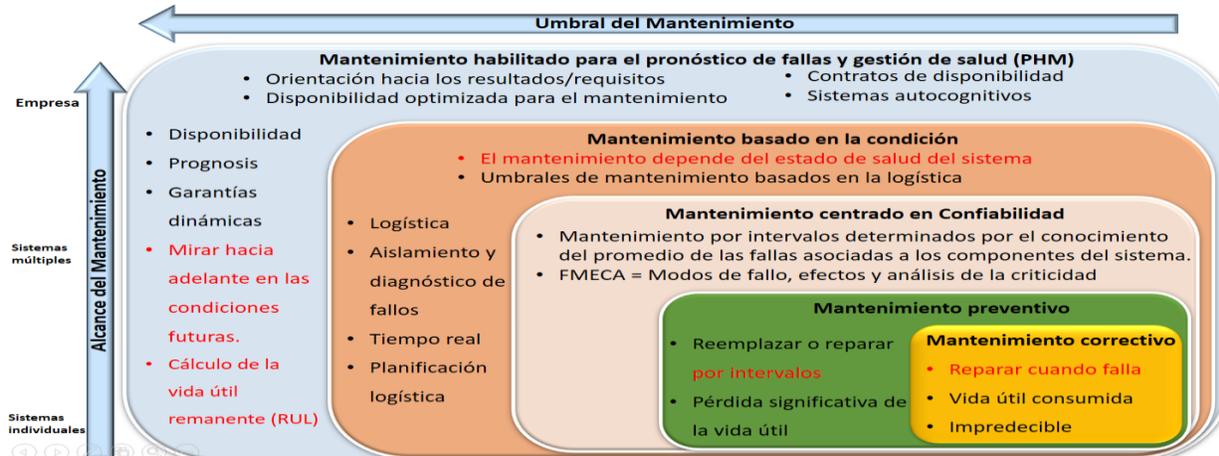
A criterio de los autores, sustentado en la experiencia de otros especialistas como Alfonso, 2009; Diez et al., 2019; Galar, 2020; Rodríguez, 2012, en la gestión del mantenimiento se han ido dando pasos de avances que transitan desde la diagnosis o mantenimiento basado en la condición, hasta la prognosis o mantenimiento predictivo basado en la predicción del estado futuro del activo, pero se debe tener en cuenta que estas propuestas se han diseñado para componentes específicos, nunca para subsistemas o sistemas completos.

Actualmente existe la necesidad de enfocar este mantenimiento predictivo y prescriptivo hacia un entorno de sistemas complejos, de sistemas holísticos, es decir, existe la necesidad de modificar el mantenimiento tradicional centrado en acciones correctivas y preventivas donde la actividad visceral estaba dirigida a “cuando se rompa se repara” hasta un modelo más actual de anticipación del fallo (figura 4).

Las tendencias más actuales significan el empleo de Gemelos digitales (*Digital Twins*). En la actualidad se precisa de un modelo de anticipación que facilite una visión holística de la salud de todo el activo, donde, dicha anticipación al fallo, supere la mera sustitución de un componente (Abbas et al., 2021 y Galar, 2020).

Figura 4

Necesidad actual del enfoque en la actividad del mantenimiento



Fuente: elaboración propia a partir de Abbas et al., 2021 y Galar, 2020.

Lo enunciado anteriormente justifica que el paradigma del mantenimiento está cambiando sus tradicionales prácticas, donde lo que se hace es una inspección periódica o un mantenimiento sistemático, un mantenimiento de reemplazos prematuros, basado en el mantenimiento preventivo, hacia un mantenimiento predictivo donde se reemplace o actúe en base a la necesidad y no en base a un calendario.

Lo que comúnmente se hace a nivel internacional en la mayoría de las organizaciones, es manejar los datos o la información de campo que se obtiene utilizando las bondades de la inteligencia artificial (en lo adelante, IA), actividad que, aunque no es nueva, posee limitaciones en su manejo. Se puede asumir, teniendo en cuenta el criterio de varios especialistas, que las metas que se habían propuesto para 2020 respecto al mantenimiento predictivo para la industria 4.0 no se lograron cumplir, solo se registraron casos de uso, demostradores, pruebas de concepto o proyectos pilotos, pero no existen grandes escalados de proyectos donde se actúe en base a la necesidad.

Teniendo en cuenta esta conclusión, se asume que una brecha de la ciencia de hoy está en la evolución hacia gemelos digitales (en operación y mantenimiento) para sistemas complejos que permitan actuar de forma predictiva, es decir, se precisa de un escalado para desarrollar un gemelo digital para un sistema completo, complejo y actuar de manera predictiva para él y no solo para un componente o parte del sistema (Abbas et al., 2021; Galar, 2020; González, 2020 y Pascual et al., 2019).

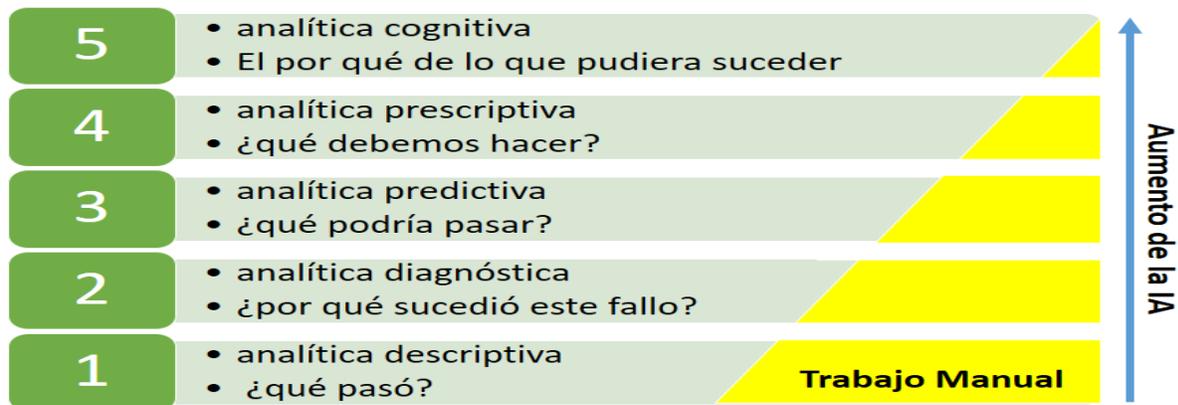
A nivel internacional, se ha evolucionado en la actividad del análisis de datos a través del tiempo (figura 5). Inicialmente, se aplicaban procedimientos correspondientes a la analítica descriptiva (entendida como el análisis forense del fallo, se respondía a la interrogante: ¿qué pasó? La analítica diagnóstica ¿por qué sucedió este fallo? La

analítica predictiva ¿qué podría pasar? Y la analítica prescriptiva, recomendar qué se debe hacer y cuándo hacerlo para alargar la vida del activo.

Sin embargo, en ninguno de los casos, se ha avanzado hacia la analítica cognitiva, donde las decisiones se toman de manera automática, teniendo en cuenta que el ser humano no puede encarar de forma efectiva toda esta complejidad de decisiones (Galar, 2020).

Figura 5.

Evolución en la actividad del análisis de datos para mantenimiento.



Fuente: elaboración propia partir de Galar, 2020.

La pandemia COVID-19, demostró a nivel internacional, que son necesarios sistemas autónomos, sistemas desatendidos, donde las personas para operar y para mantener la maquinaria es mínima; estos sistemas están llamados a evitar que las fábricas y los activos se detengan (Galar, 2020).

Por las razones antes expuestas, se debe tener en cuenta la necesidad de contar con un modelo de mantenimiento cognitivo en el que las decisiones (referidas al propio mantenimiento) se tomen de forma autónoma, además de las respuestas ulteriores para sustentar esas decisiones tomadas; y es precisamente ahí donde intervienen lo que los especialistas denominan gemelo digital o “*Digital Twin*” (Galar, 2020).

No obstante, la sistematización teórica realizada revela que en la actualidad no se ha tenido total éxito al respecto, pues aun cuando se están procesando datos para el mantenimiento predictivo, aún se invierte el 80% del tiempo haciendo un pre-procesado y limpieza de datos, que implican acciones manuales y tediosas. Por otra parte, se puede industrializar de manera autónoma y automatizar para el mantenimiento predictivo de forma muy escueta (Abbas et al., 2021; Diez et al., 2019; Galar, 2020; Johnson et al., 2021 y Pascual et al., 2019).

Al implementar el mantenimiento predictivo se concreta la ayuda que presta o debe prestar el gemelo digital, o sea, en el mantenimiento predictivo, se predice lo que se sabe. Por ejemplo: si se tienen tres modos de fallo, se intenta predecir esos tres modos

de fallo, pero la idea primera para la creación de un gemelo digital para el mantenimiento es que este ayude a predecir lo invisibles. Es decir, identificar aquellos modos de fallo que están ahí y que no se han reconocido en el sistema debido a la conjunción de múltiples sistemas o subsistemas de sistemas en sistemas complejos.

Por lo tanto, lo que se necesita es un sistema de mantenimiento basado en *Digital Twin* (gemelo digital) que pueda identificar esas fallas, inconveniencias que no son visibles, tan complejas que no se pueden identificar de golpe o con relativa facilidad por la organización (Galar, 2020; González, 2020; Oakes et al., 2021; Palensky et al., 2021; Pascual et al., 2019; Wang et al., 2021; Wenner et al., 2021).

A esto es a lo que los autores anteriores denominan el efecto mariposa digital (*the digital butterfly effect*). Es decir, cuando se está creando un activo donde interactúan sistemas suficientemente complejos, necesariamente implica el surgimiento de una serie de fallos que son muchos más que los modos de fallo sumados de todos esos sistemas, o sea, si se tienen tres sistemas, con ocho modos de fallos cada uno, esos 24 modos de fallo no son los totales de sistema complejo, lo más probable es que se tengan, por citar un ejemplo, otros 40 modos de fallos creados debido a la interacción de estos sistemas.

Por tanto, cuando se está frente a un modelo complejo, donde interactúan subsistemas que son muy complejos, como pueden ser en la aeronáutica, los ferrocarriles, la biotecnología, la minería (teniendo en cuenta la complejidad del proceso de la manufactura), los fallos de estos sistemas son muy difíciles de enfocar desde una perspectiva clásica del mantenimiento.

Hoy día existe la necesidad imperante de identificar estos “modos de fallos invisibles” y es el *Digital Twin* o gemelo digital quien tiene que ayudar en este proceso (Abbas et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Galar, 2020; González, 2020; Oakes et al., 2021; Palensky et al., 2021; Pascual et al., 2019; Pystina et al., 2021; Reyes y Garg, 2021; Wang et al., 2021; Wenner et al., 2021).

El gemelo digital no debe verse solo como un modelo 3D o para mostrarlo como una mascota en una feria, sino que sea un modelo en 3D para poder ver como un activo se degrada si se opera de determinadas maneras (Abbas et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Galar, 2020; Pascual et al., 2019).

A partir de los descrito, se puede asumir que el objetivo principal de un gemelo digital debe ser identificar: ¿qué pasará en el futuro? y ¿cuándo sucederá?, donde se modifica el paradigma tradicional del diagnóstico, donde lo que se hace es identificar: ¿qué ha pasado? y ¿qué está pasado?

Hoy día, lo que se exige es hacer la predicción de los fallos (Galar, 2020; Pascual et al., 2019 y Shim et al., 2019), es decir, hay que enfrentar la predicción de fallos de diferentes sistemas complejos y dicha predicción conlleva al enfrentamiento de nuevos problemas.

Dos de los problemas más usuales en operación y mantenimiento son los llamados “cisne negro” y el “canto del cisne”.

Se le denomina cisne negro, en producción y mantenimiento, al evento que tiene una frecuencia de aparición muy baja pero que su impacto es devastador.

Más formalmente, un evento “cisne negro”, es un acontecimiento o suceso que se desvía de lo que normalmente se espera de una situación y que sería extremadamente difícil de predecir; por tanto, teniendo en cuenta que el ser humano está condicionado por sus conocimientos, muchas veces esto genera que la predicción de nuevos fallos esté limitada y haya que tener muy en cuenta, el sesgo del conocimiento a la hora de predecir fallos en operación y mantenimiento (Abbas et al., 2021; Galar, 2020; Pascual et al., 2019; Ustundag y Cevikcan, 2020).

La pregunta en mantenimiento es: ¿cuál es el “canto de cisne⁴” de un activo?, ¿cuál es la señal unívoca de que la maquinaria está a punto de no ser funcional (fallar o “morir”)?

Estas ideas no son triviales o ajenas al bregar diario de aquellos que trabajan en empresas productoras de bienes o servicios. Está claro que se conoce que un sistema va a morir o fallar porque se han identificado que partes de este no funcionan correctamente o han alcanzado cierto umbral, pero lograr identificar el canto del cisne, que es identificar lo que unívocamente deja el sistema inutilizable es algo relativamente complejo.

Por lo tanto, a la hora de predecir los fallos, un aspecto fundamental es saber cuándo el activo va a perder la capacidad para cumplir su función. Para lograr esto es necesario disponer del conocimiento para enfrentar las perspectivas de los riesgos sobre los activos a los cuales nos interesa implementarles el mantenimiento predictivo. Lo básico al respecto es el conocimiento histórico (disponible en los datos) + el conocimiento de dominio (o knowledge dimension) + las sorpresas (debido a la propia de la integración de sistemas complejos) (Abbas et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Galar, 2020; Oakes et al., 2021; Pascual et al., 2019; Pystina et al., 2021; Ustundag y Cevikcan, 2020; Wang et al., 2021 y Zhao et al., 2022):

La solución a esta perspectiva es crear una réplica de la realidad, que se pueda tener disponible y en ella, analizar cómo se deteriora, mientras se mantienen los activos de manera totalmente funcionales (Abbas et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Galar, 2020; Pascual et al., 2019 y Pystina et al., 2021).

Un gemelo digital o réplica digital es un modelo virtual de un activo físico como un producto, un proceso, un sistema o una instalación. Dicha replica digital toma y utiliza datos de un activo físico real para comprender mejor y aumentar su rendimiento. Gracias a una combinación de inteligencia artificial (IA), aprendizaje automático

⁴ El término “canto del cisne” proviene del tercer siglo A.C. donde se decía que el cisne pasa toda su vida en silencio, pero emite un hermoso canto justo antes de morir.

(machine learning) y análisis de datos (data analytics), los gemelos digitales pueden reflejar un gemelo físico y revelar los problemas antes de que se produzcan. Para ello, se basan en una serie de sensores integrados en el mundo físico para transferir datos en tiempo real sobre el proceso operativo y el entorno. Los datos recogidos por los sensores conectados se analizan en la “nube” y son accesibles a través de un panel de control (Ladj et al., 2021; Oakes et al., 2021).

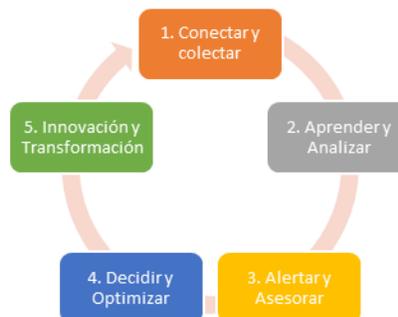
Un *digital twin* es un modelo ingenieril orientado al negocio, proveedor de servicios, en el cual se introducen datos (de contexto, llamados *inputs*) y se obtienen como resultado u *outcomes*: disponibilidad, puntualidad, capacidad, entre otros, en función del activo que se trate. En este *digital twin*, lo deseado es tener esos datos de entrada o *inputs* como forma de inversión y los *outputs* o resultados como el desempeño del activo.

Un *digital twin* puede ser muchas cosas, en general, es un modelo que se va a nutrir de manera permanente de su entorno, que va a necesitar formas de control y, sobre todo, tiene que ayudar en la gestión de los riesgos, en la gestión del diagnóstico, en la gestión del pronóstico y en la gestión de las decisiones de mantenimiento (figura 6).

A nivel internacional, el *digital twin* entra con mucha fuerza donde hay una sensorización masiva de los activos y una preocupación por la pérdida de funciones de estos activos (Galar, 2020; Pascual et al., 2019).

Figura 6

Funciones básicas del “Digital Twin”.



Fuente: elaboración propia a partir de (Abbas et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Galar, 2020).

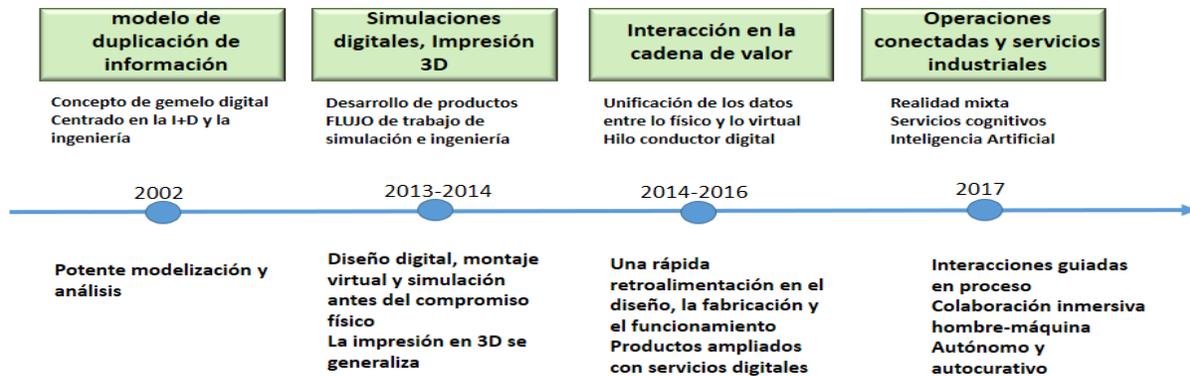
Los *digital twins* han evolucionado gracias a esa gran capacidad computacional que existe hoy, donde se integran modelos ingenieriles con datos de campo fácilmente accesibles obtenidos a costos muy competitivos gracias al internet de las cosas (IoT) (figura 7).

Por 20 años, los digital twins han evolucionado, pasando desde la sensorización de manera masiva, luego a la virtualización y últimamente a la digitalización; es decir, donde se mezcla el modelo ingenieril con datos de campo y esto es gracias a esa gran capacidad de computación y comunicaciones en que se pueden traer datos de campo y

modelos y juntarlos de una manera unívoca (Abbas et al., 2021; Diez et al., 2019; Galar, 2020 y Pascual et al., 2019).

Figura 7

Evolución de los Digital Twins.



Fuente: elaboración propia a partir de Abbas et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Galar, 2020; Pascual et al., 2019; Reyes y Garg, 2021 y Wenner et al., 2021.

Al asumir lo descrito hasta el momento, un *digital twins* no puede ser un modelo de adorno, debe ser un modelo de servicio; una instancia virtual del producto físico que es inteligente y está conectado.

En la actualidad el *digital twin* se convierte en el punto de unión donde fabricantes y usuarios finales convergen, ponen los datos y los modelos y obtienen los beneficios que cada uno los fabricantes y usuarios finales necesita.

Por tanto, con un *digital twin* se busca (Abbas et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Galar, 2020; Pascual et al., 2019):

- tener un producto conectado,
- creación de una plataforma como servitizadora para los fabricantes de bienes, y
- creación de servicios de soporte logístico y servicios de mantenimiento remoto.

En la bibliografía especializada se destacan dos modelos básicos de *digital twin* basados en el enfoque de modelización: gemelo digital estocástico y gemelo digital en tiempo real.

Un gemelo digital estocástico: es donde se utilizan como parámetros para caracterizar los modelos, variables aleatorias que tienen comportamientos estimados, pero no se conoce con certidumbre previamente cuál será el valor que tomen. Por ejemplo, el modelo *digital twin* estocástico es aquel que tiene un único *digital twin* donde se proyectan todos los posibles modos de fallo de todo un conjunto de activos, por ejemplo, de 100 autobuses. De esta manera, se tiene un elemento de prueba donde se están proyectando todos los fallos de todos los autobuses, por tanto, no es un gemelo

digital único, sino un gemelo que sirve básicamente para estimar la vida media de los diferentes componentes que se tiene en esa flota de autobuses. Este gemelo digital estocástico es probabilístico, donde lo que se estima es la densidad de probabilidad de fallos de los diferentes subsistemas.

Un gemelo digital en tiempo real se identifica con un modelo donde es posible obtener valores del desempeño del sistema y los estados del sistema en tiempo real (para el caso que nos ocupa, tiempo real significa que los datos referidos a un sistema se analizan y actualizan al ritmo en que se reciben), si se asume que la flota de autobuses anterior, sería de 100 gemelos digitales, uno para cada autobús, donde cada gemelo digital es único y se está actualizando permanentemente. Aquí lo que se estimaría sería la probabilidad de fallo de una unidad específica.

En ambos casos, el principal servicio que prestan estos modelos es el Soporte Logístico Integrado (ILS) para mejorar los perfiles de misión del activo en cuestión (Galar, 2020 y Pascual et al., 2019).

La propia evolución de los gemelos digitales ha permitido clasificarlos, además, a partir de su funcionalidad, basados en la jerarquía, en la tecnología de entrada, y basados en la capacidad; de estas últimas, la manera de clasificarlos más frecuente ha sido según la tecnología de entrada en (Abbas et al., 2021; Galar, 2020; Pascual et al., 2019):

Primeramente, el Gemelo Digital 1.0 es considerado el más sencillo de todos y está sustentado en Operational Technologies o Tecnologías Operativas (OT), es decir, aporta datos que están cerca del activo, provenientes de sensores que están cerca del activo, de esta forma, se utilizan redes neuronales, análisis de regresión para determinar y analizar la desviación de la normalidad y conocer el comportamiento del activo.

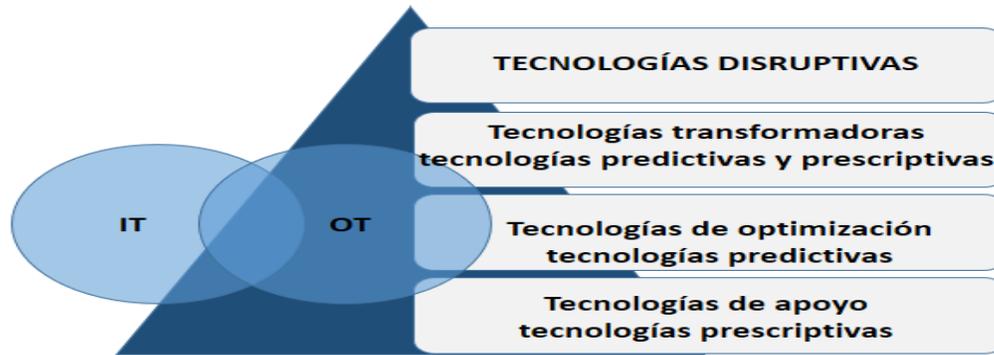
Para entender como estos gemelos digitales han evolucionado a *Daigital twin 2.0* se debe comprender qué son las taxonomías y las antologías.

En un *Daigital twin 2.0* se entrelazan taxonomías y antologías, donde las primeras representan la descomposición del activo de sistema a componente, mientras que las segundas constituyen conexiones entre bases de datos diferentes. Por ejemplo: se detecta una vibración en un activo que genera una parada de máquina, esto a su vez implica la compra de un repuesto, que genera una orden de desarme del activo y así sucesivamente. Todas estas actividades concatenadas, son conexiones entre bases de datos diferentes es a lo que se le denomina antología en operación y mantenimiento.

En definitiva, la antología es la convergencia entre tecnologías de la información (IT) con Operational Technologies o Tecnologías Operativas (OT), donde se pueden explicar un conjunto más amplio de ideas, es decir, explicar qué pasa con una orden de trabajo, cuánta confiabilidad se recupera después de esa orden de trabajo y qué sucede después de una parada, entre otras acciones (figura 8).

Figura 8

Evolución hacia el Digital Twin 2.0.



Fuente: Elaboración propia a partir de Abbas et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Galar, 2020; Pascual et al., 2019; Pystina et al., 2021 y Zhao et al., 2022.

Esta convergencia de IT con OT, determina que la explotación de los datos (referida a operación y mantenimiento) sea mucho más compleja. En un primer lugar, porque se crean necesariamente metadatos, donde se insertan los eventos que se tienen disponibles de manera asíncrona en los datos, pero a la larga esto facilita la explicación de las discontinuidades presentes en los datos.

No obstante, todas estas ideas aún son incompletas, debido a que continuamente se están registrando muchísimos datos en la organización, y esto genera una brecha digital enorme entre la información que se está capturando y el conocimiento que se está extrayendo (Abbas et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Galar, 2020; Pascual et al., 2019 y Pystina et al., 2021).

Cómo se logra mezclar todo ese conocimiento al conocimiento de mantenimiento, pues, con lo que los especialistas llaman “los motores de contexto” (Abbas et al., 2021; Galar, 2020; Pascual et al., 2019 y Pystina et al., 2021).

En mantenimiento, el contexto está representado por las variables climáticas o medioambientales, socioeconómicas, sociopolíticas, es decir, todo lo que rodea contextualmente al activo. Por ejemplo, no funcionan igual autobuses para la transportación de pasajeros en la Ciudad de La Habana que en la ciudad de Las Tunas o en Santiago de Cuba, donde influyen, por ejemplo, la cantidad de personas que se transportan, características de las vías, características del terreno, entre otras.

Todo esto genera los llamados gemelos digitales 2.1, donde al analizar datos de contexto, permite ampliar la capacidad de atinar mucho más en ese pronóstico de fallos que se planifica (Galar, 2020).

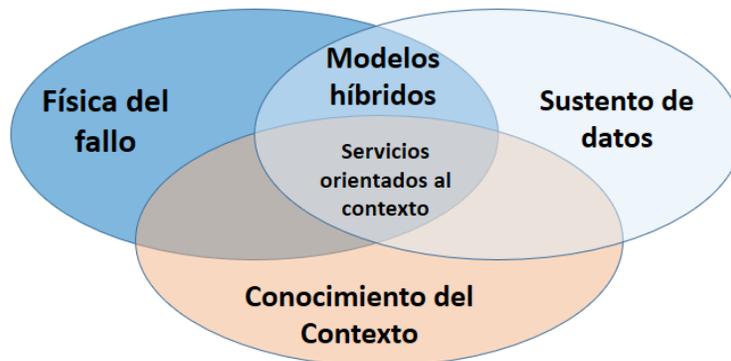
No obstante, aún quedan cosas por resolver, es por ello que se diseñan o surgen modelos híbridos de gemelos digitales que mezclan modelos basados en los datos con modelos basados en la física del fallo (estos últimos capturan la base física del fallo en

un modelo que relaciona: las fuerzas que causan el daño con su efecto) (Abbas et al., 2021 y Galar, 2020).

Estos modelos híbridos de *Digital Twin* combinan los conocimientos sobre el proceso físico y la información procedente de las lecturas de los sensores para mejorar las capacidades de pronóstico, donde la integración de los datos medidos y la física, puede conducir a una reducción de la incertidumbre; por ejemplo, ajustar la predicción del modelo utilizando los datos observados (figura 9).

Figura 9

Modelos híbridos de digital twin.

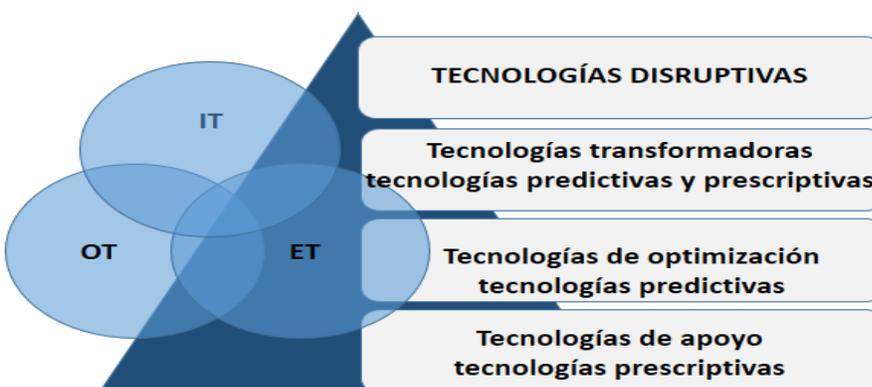


Fuente: elaboración propia a partir de Abbas et al., 2021; Galar, 2020; Oakes et al., 2021; Pascual et al., 2019; Ustundag y Cevikcan, 2020.

Hoy se defienden la idea de que esto es mucho más que mezclar simulación con operación y mantenimiento, ya que significa hibridar simulación en tiempo real con datos en tiempo real para obtener un gemelo digital potente (Galar, 2020).

Figura 10

Digital twin 3.0.



Fuente: elaboración propia a partir de Galar, 2020 y Pascual et al., 2019

En conclusión, estos modelos híbridos generan el *digital twin* 3.0, como modelos híbridos en el cual la física del fallo, con los datos de contexto, facilitan servicios basados en contexto, donde se hibridan: las IT, OT y las tecnologías de ingeniería (Engineering Technologies, ET). Así, se convierten en un modelado físico del activo (Abbas et al., 2021; Agrawal et al., 2022; Galar, 2020; Oakes et al., 2021; Palensky et al., 2021; Pascual et al., 2019; Pystina et al., 2021; Reyes y Garg, 2021; Ustundag y Cevikcan, 2020; Wenner et al., 2021; Zakharov y Derksen, 2020) (figura 10).

Conclusiones

A partir de la sistematización teórica de los referentes relacionados con la gestión del mantenimiento se pudo identificar que el paradigma de dicha gestión está cambiando sus tradicionales prácticas hacia un mantenimiento predictivo donde impera la necesidad de actuar en base a la necesidad y no en base a un calendario. De esta manera, los digital twins surgen como modelos ingenieriles emergentes orientados al negocio, esencialmente a los proveedores de servicios, en consecuencia, deben facilitar la gestión de los riesgos, la gestión del diagnóstico, la gestión del pronóstico y la gestión de las decisiones de mantenimiento de los activos.

Referencias bibliográficas

- Abbas, M., Liu, Y. y Cai, B. (2021). *Digital Twin-based Prognostics and Health Management for Subsea systems: Concepts, Classification, Opportunities and Challenges*. Proceedings of the 31st European Safety and Reliability Conference. <https://www.rpsonline.com.sg/proceedings/9789811820168/html/070.xml>
- Agrawal, A., Fischer, M. y Singh, V. (2022). Digital Twin: From Concept to Practice. *Journal of Management in Engineering*, 38(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0001034](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0001034)
- Aivaliotis, P., Georgoulis, K., Arkouli, Z. y Makris, S. (2019). Methodology for enabling digital twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia CIRP*, 81, 417-422. <https://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.072>
- Alfonso, A. (2009). *Procedimiento para la asistencia decisional al proceso de tercerización de la ejecución del mantenimiento* [Tesis doctoral, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas]. Cuba.
- D'Amico, D., Ekoyuncu, J., Addepalli, S., Smith, C., Keedwell, E., Sibson, J. y Penver, S. (2019). Conceptual framework of a digital twin to evaluate the degradation status of complex engineering systems. *Procedia CIRP*, 86, 61-67. <https://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.043>
- Diez, A., Del Ser, J., Galar, D. y Sierra, B. (2019). Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0. *Information Fusion*, 50, 92-111. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2018.10.005>

- Galar, D. (2020). *Gemelos digitales para operación y mantenimiento*. Tecnal: a. Webinar. <https://www.tecnalia.com/agenda/gemelos-digitales-para-operacion-y-mantenimiento>
- González, C. (2020). *Gemelos industriales y mantenimiento industrial*. <https://software.aeromarine.es/los-gemelos-digitales-y-el-mantenimiento-industrial/>
- Johnson, A., Heaton, J., Yule, S., Luke, S., Pocock, D., Parlikad, A. K. y Schooling, J. (2021). Informing the information requirements of a digital twin: a rail industry case study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Smart Infrastructure and Construction*, 40(XXXX), 1-13. <https://dx.doi.org/10.1680/jsmic.20.00017>
- Ladj, A., Wang, Z., Meski, O., Belkadi, F., Ritou, M. y Da Cunha, C. (2021). A knowledge-based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 168-179. <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-manufacturing-systems/vol/58/part/PA>
- Marrero, R. A., Vilalta, J. A. y Martínez, E. (2019). Modelo de diagnóstico-planificación y control del mantenimiento. *Ingeniería Industrial*, 40(2), 148-160. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59362019000200148
- Oakes, B. J., Parsai, A., Van Mierlo, S., Demeyer, S., Denil, J., De Meulenaere, P., & Vangheluwe, H. (2021). Improving Digital Twin Experience Reports. *MODELSWARD*. <https://doi.org/10.5220/0010236101790190>
- Palensky, P., Cvetkovic, M., Gusain, D. y Joseph, A. (2021). Digital twins and their use in future power systems. *Digital Twin*, 1(4), 4. <http://dx.doi.org/10.12688/digitaltwin.17435.2>
- Pascual, D. G., Daponte, P. y Kumar, U. (2019). *Handbook of industry 4.0 and SMART systems*. Routledge. CRC Press.
- Pystina, K., Sekhari, A., Gzara, L. y Cheutet, V. (2021). *Digital Twin for production systems: a literature perspective*. SOHOMA'21-11th International Workshop on Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future. <https://hal.science/hal-03457473/document>
- Reyes, M. F. y Garg, S. (2021). *Adaptability of Manufacturing Operations through Digital Twins*. MIT Libraries. DSpace@MIT. <https://hdl.handle.net/1721.1/130954>
- Rodríguez, A. (2012). *Manual de gestión de mantenimiento* [Tesis de grado, Universidad Central de Las Villas Marta Abreu]. Cuba. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/5574>
- Shim, C., Kang, H. y Dang, N. (2019). *Digital twin models for maintenance of cable-supported bridges*. International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC). <http://dx.doi.org/10.1680/icsic.64669.737>

- Ustundag, A. y Cevikcan, E. (2020). Industry 4.0: managing the digital transformation. *Springer*. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5>
- Wang, Z., Itard, L. y Meijer, A. (2021). *Trends in digital twinning for design, operation and maintenance in non-residential buildings: a short review from literature*. IEBB THEMA 2. https://tki-bouwentechneek.nl/wp-content/uploads/2_Report-IEBB-activity-1.4-final.pdf
- Wenner, M., Meyer-Westphal, M., Herbrand, M. y Ullerich, C. (2021). *The Concept of the Digital Twin to Revolutionise the Infrastructure Maintenance: the Pilot Project smartBRIDGE Hamburg*. 27 th ITS World Congress. <https://www.hamburg.com/world-congress-2021-17226>
- Zakharov, L. y Derksen, L. (2020). Hardware and Software Infrastructure of Digital Twin Technology. *KnE Engineering*. <https://dx.doi.org/10.18502/keg.v5i3.6754>
- Zhao, Y., Wang, N., Liu, Z. & Mu, E. (2022). Construction Theory for a Building Intelligent Operation and Maintenance System Based on Digital Twins and Machine Learning. *Buildings*, 12(2), 87. <https://dx.doi.org/10.3390/buildings12020087>

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Los autores participaron en la búsqueda y análisis de la información para el artículo, así como en su diseño y redacción.