

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

**ESTUDIO DE USO DE SOFTWARES DIGITAL TWINS Y TECNOLOGÍA IOT PARA
EL FORTALECIMIENTO DEL ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ UTILIZANDO SIMULACIÓN**

Trabajo de Titulación para optar al Título de
Ingeniero en Mantenimiento Industrial

Alumno: Amadiel Esteban Vicencio Nuñez

Profesor Guía: Ing. Félix Arnaldo Pizarro Martínez

2023

RESUMEN

KEYWORDS: GEMELOS DIGITALES, INTERNET OF THINGS , ANÁLISIS CAUSA RAÍZ, TECNOLOGÍA, MANTENIMIENTO, ASSET PERFORMANCE MANAGEMENT.

Este proyecto fue realizado con el fin de generar una guía de entendimiento de las distintas tecnologías que trajo consigo la cuarta revolución industrial, con énfasis en IoT, y los flujos de información que se desprenden de estos dispositivos, además repasaremos de qué forma Gemelos Digitales (DT) integran todas estas tecnologías, y como estas aportan al mantenimiento industrial, por otra parte, explorar las capacidades de las simulaciones computacionales y las tecnologías antes mencionadas en búsqueda de una propuesta de mejora para el Análisis causa Raíz (RCA).

Como punto de partida de esta investigación, pondremos en contexto que son y para qué sirven los gemelos digitales, diferenciaremos distintos tipos y niveles de madures que pueden alcanzar dependiendo de su nivel de integración tecnológica, además examinaremos el mercado para entrever que se puede esperar de los gemelos digitales a futuro.

A continuación, analizaremos de qué forma los gemelos digitales generan un plataforma de integración para distintas tecnologías, además de aclarar confusiones comunes que se generan al pensar en un gemelo digital, a su vez identificaremos el marco normativo actual que rodea a los gemelos digitales y repasaremos algunas propuestas y plataformas comerciales de grandes compañías como Autodesk, General Electric, ANSYS, entre otras, para generar DT .

Finalmente, Revisaremos como los flujos de información han cambiado tanto la forma como el fondo en la industria, modificando la gestión de los activos, creando sistemas de gestión cada vez más integrados e inteligentes con el fin de aprovechar al máximo el flujo de información, incluso llegando a guiar la toma de decisiones empresariales, además los cambios y nuevos mantenimientos generados a partir de la introducción de tecnología al mantenimiento, también revisaremos un ejemplo real de aplicación de DT, para terminar veremos como gemelos digitales y los sistemas APM pueden potenciar y fortalecer un análisis de causa raíz. Con el fin de disminuir los tiempos de investigación usando las capacidades de simulación.

INDICE

RESUMEN 1

INDICE..... 2

INTRODUCCIÓN..... 8

CAPÍTULO 1: ANÁLISIS Y CONCEPTOS DE TECNOLOGIAS DIGITAL TWIN..... 10

1.1. DEFINICION DEL CONCEPTO DIGITAL TWIN 11

1.2. CONTEXTO INDUSTRIA 4.0 12

1.2.1. CPS Y GEMELOS DIGITALES..... 13

1.2.2. ORIGEN DEL CONCEPTO DT BACKGROUND 15

1.2.3. CONCEPTO DE “DIGITAL TWINS” NASA..... 16

1.3. CICLOS DE SOBREENEXPECTACIÓN DE GARTNER 17

1.3.1. FASES DE UN HYPE CYCLE..... 18

1.3.2. APLICACIONES DE HYPE CYCLE 19

1.3.3. HYPE CYCLES Y DIGITAL TWINS 19

1.4. DIGITAL TWIN E INDUSTRIA 4.0 20

1.5. INDUSTRIA Y MERCADO DE LOS GEMELOS DIGITALES 22

1.5.1. INDUSTRIAS..... 22

1.5.2. MERCADO 23

1.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LOS DT 24

1.6.1. VENTAJAS Y BENEFICIOS 24

1.6.2. DESVENTAJAS..... 25

1.7. TIPOS DE GEMELOS DIGITALES 26

1.7.1. GEMELOS DIGITALES BIM 28

1.7.2. GEMELOS DIGITALES INDUSTIALES 28

1.8. NIVELES DE GEMELOS DIGITALES 30

1.8.1. PERSPECTIVA ANALÍTICA MADUREZ DEL GEMELO DIGITAL .. 31

1.8.2. NIVELES DE MADUREZ Y CAPACIDADES..... 32

CAPÍTULO 2: INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA,NORMATIVAS Y SOFTWARES 34

2.1. INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS 35

2.1.1	GEMELOS DIGITALES Y SCADA	35
2.1.2	GEMELOS DIGITALES Y SIMULACIONES	38
2.1.3	ARQUITECTURA DE LOS GEMELOS DIGITALES	41
2.1.4	INTEGRACIÓN DE TECNOLOGIAS IOT, IIOT Y ML.....	41
(i)	Internet de las cosas e IIoT:.....	41
(ii)	Integración de datos en tiempo real:	42
(iii)	Aprendizaje automático en tiempo real:.....	43
2.2.	NORMATIVAS Y ESTÁNDARES QUE INVOLUCRAN DT.....	46
2.2.1	NORMA IEC TS N°62832.....	46
2.2.2	NORMA IEEE N°P2806.....	47
2.2.3	NORMA IPC N°2551	47
2.2.4	NORMA ISO 23247:2021.....	48
2.3.	DIGITAL TWIN CONSORTIUM	50
2.4.	SOFTWARES Y PLATAFORMAS EN EL MERCADO.....	52
2.4.1	ANSYS TWIN BUILDER Y TWIN DEPLOYER	53
2.4.2	PREDIX GENERAL ELECTRIC	54
2.4.3	AUTODESK FORGE	55
2.4.4	DASSAULT SYSTEMES VIRTUAL TWIN.....	55
CAPÍTULO 3: APLICACIONES DE MANTENIMIENTO Y PROPUESTA DE FORTALECIMIENTO DE RCA USANDO DT Y SIMULACIÓN		58
3.1.	INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA SISTEMAS DE GESTIÓN.....	59
3.1.1	EVOLUCIÓN FUJO DE INFORMACIÓN.....	59
3.1.2	SISTEMA DE GESTIÓN DE ACTIVOS	60
3.1.3	MARCO NORMATIVO ACTUAL GESTIÓN DE ACTIVOS	60
3.1.4	NORMA ISO 55001 Y LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE ACTIVOS.....	62
3.1.5	SISTEMAS DE GESTIÓN DE ACTIVOS FÍSICOS	63
3.1.6	ECOSISTEMA EAM-APM Y AIP	65
(i)	Uso de la IA y IoT para impulsar el valor comercial.....	65
(ii)	Elementos que componen la APM.....	66
(iii)	APM Gemelos digitales y flujo de información.	67
3.2.	EVOLUCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO	69

- 3.2.1 MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN 70
 - (i) Mantenimiento por Prueba e Inspección 70
 - (ii) Mantenimiento por Monitoreo de Condición 71
- 3.2.2 MANTENIMIENTO PREDICTIVO..... 71
- 3.2.3 MANTENIMIENTO PRESCRIPTIVO..... 72
- 3.2.4 MANTENIMIENTO CBM+ Y PHM..... 73
- 3.2.5 MANTENIMIENTO INTELIGENTE..... 74
- 3.2.6 SELECCIÓN DE TIPO DE MANTENIMIENTO..... 74
- 3.3. VENTAJAS DEL USO DE SISTEMAS DT/APM EN MANT. 76
 - (i) Historial de activos..... 77
 - (ii) Optimización de operaciones y Estrategias de mantenimiento 77
 - (iii) Simular escenarios futuros 77
 - (iv) Otras ventajas conceptos canto del cisne y cisne negro 78
- 3.4. EJEMPLO DE APLICACIÓN DE UN DT EN MANTENIMIENTO..... 79
- 3.5. FORTALECIMIENTO DE ANÁLISIS USANDO SIMULACIÓN..... 83
 - 3.5.1 DEFINICIÓN DE RCA 83
 - 3.5.2 RCA Y MEJORA CONTINUA 84
 - 3.5.3 CÓMO CONDUCIR UN ANÁLISIS CAUSA RAÍZ 84
 - 3.5.4 HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ..... 85
 - 3.5.5 REALIZACIÓN DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ 86
 - 3.5.6 CUANDO SE DEBE REALIZAR UN ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ 87
 - 3.5.7 ENFOQUES FRENTE A LA OCURRENCIA DE UN EVENTO 88
 - 3.5.8 FORTALECIMIENTO DE RCA USANDO SIMULACIÓN 89
 - 3.5.9 ANÁLISIS CAUSA RAÍZ Y SISTEMAS APM/DIGITAL TWINS..... 90
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 94
- BIBLIOGRAFÍA..... 96
- ANEXOS 98

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1 " Proyección 5ta Revolución industrial " 12

Ilustración 1-2 " Evolución del concepto DT en el tiempo " 17

Ilustración 1-3 " Extracto Reporte de Expansión mercado Digital Twins " 24

Ilustración 1-4 " Ciclo Cerrado de un Gemelo Digital " 27

Ilustración 1-5 " Propuesta de Etapas Metodología BIM " 28

Ilustración 2-1 " Evolución de representaciones virtuales " 39

Ilustración 2-2 " Formatos de intercambio FMI-FMU " 40

Ilustración 2-3 " Logo Corporativo OMG Digital Twin Consortium " 50

Ilustración 2-4 " Ejemplo de DT de GE " 54

Ilustración 2-5 " Plataforma Autodesk Forge " 55

Ilustración 2-6 " 3dExperience Virtual Twin " 57

Ilustración 3-1 " Cambios en los flujos de información " 59

Ilustración 3-2 " Conjunto normas ISO 55.000 " 63

Ilustración 3-3 " Arquitectura de integración SAP Gemelo digital " 64

Ilustración 3-4 " Niveles de Madures APM Según integración información " 67

Ilustración 3-5 " Tipologías de mantenimiento ISO 14224:2016 " 69

Ilustración 3-6 " generación de Historial operacional " 77

Ilustración 3-7 " Simulación de escenarios " 78

Ilustración 3-8 " Ejemplo monitoreo de condición con set de alarmas " 78

Ilustración 3-9 " Ejemplo camiones con bombas de desplazamiento positivo " 80

Ilustración 3-10 " Ejemplo Despliegue de bombas-DT-Monitoreo condición " 81

Ilustración 3-11 " Modulo RCA APM " 91

Ilustración 3-12 " Árbol lógico de fallas interactivo APM GE " 92

ÍNDICE DE DIAGRAMAS

Diagrama 1-1 "Arquitectura básica Gemelo Digital" 11

Diagrama 1-2 " Relación DT/CPS " 15

Diagrama 1-3 " Conceptualización ideal para PLM " 16

Diagrama 2-1 " Diagrama simplificado funcionamiento SCADA " 35

Diagrama 2-2 " Diagrama simplificado arquitectura SCADA " 36

Diagrama 2-3 " Integración arquitectura SCADA " 37

Diagrama 2-4 " Arquitectura de red " 42

Diagrama 2-5 " Flujo de información integrado en un Gemelo Digital " 45

Diagrama 2-6 " Arquitectura de funcionamiento DT ANSYS " 53

Diagrama 3-1 " Ejemplo de sistema de gestión de activos físicos 8 fases " 62

Diagrama 3-2 " Relación EAM-APM y AIP " 66

Diagrama 3-3 " Flujo general de trabajo de mantenimiento CBM " 70

Diagrama 3-4 " Flujo de trabajo mantenimiento predictivo " 72

Diagrama 3-5 " Factores determinación de riesgo " 75

Diagrama 3-6 " Seguimiento de causas que originan un problema " 84

Diagrama 3-7 " Enfoque clásico aproximación a eventos fallo " 88

Diagrama 3-8 " Enfoque Ingenieril uso RCA aproximación a eventos fallo " 89

Diagrama 3-9 " Enfoque ingenieril uso de RCA potenciado con simulación " 89

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfico 1-1 " Fases de un Hype Cycle de Gartner " 18

Gráfico 1-2 " Hype Cicle de tecnologías emergentes Año 2017 " 20

Gráfico 1-3 " Grafico N° de publicaciones VS Año " 21

Gráfico 1-4 " Grafico Niveles de maduración DT " 32

Gráfico 3-1 " Curva P-F " 71

Gráfico 3-2 " Evolución de la tecnología de mantenimiento " 73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 " Capacidades según nivel de maduración " 33

Tabla 2-1 " Ventajas de IIoT v/s SCADA " 38

Tabla 3-1 " Síntesis CMMS-EAM-APM " 68

Tabla 3-2 " Pasos de Investigación causa Raíz " 85

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

SIGLAS

OT:	Operational Technology (OT: Tecnologías de operación)
IT:	Information Technology (IT: Tecnologías de la información)
IoT:	Internet of Things (IoT: Internet de las cosas)
IIoT:	Industrial Internet of Things (IIoT: Internet Industrial de las cosas)
CPS:	Cyber-physical systems (CPS: Sistema Ciber físico)
DT:	Digital TWIN (DT: Gemelo Digital)
RUL:	Remaining useful life (RUL: Vida Útil Remanente (esperada))
ERP:	Enterprise Resource Planning (ERP: Sistema de planificación de recursos empresariales)
PHM:	Prognosis Health Management (PHM: Pronósticos y gestión de salud)
CBM:	Condition Based Maintenance (CBM: Mantenimiento basado en condición)
RCM:	Reliability centered maintenance (RCM: Mantenimiento centrado en confiabilidad)
TLCSM:	Total Life Cycle System Management (TLCSM: Gestión del ciclo de Vida total (completo))
PLM:	Product Lifecycle Management (PLM: Gestión del ciclo de vida)
SCADA:	Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA: Supervisión, Control y Adquisición de Datos)
OEM:	Original Equipment Manufacturer (OEM: Fabricante de equipo Original)
APM:	Asset Performance Management (APM: Gestión Desempeño de Activos)
KPI:	Key Performance Indicator (KPI: Indicador clave de desempeño)
MTBF:	Mean Time Between Failures (MTBF: Tiempo medio entre fallas)
CAE:	Computer-aided engineering (CAE: Ingeniería asistida por computadora)
DEM:	Discrete element method (DEM: Método de elementos discretos)
FEM:	Finite element method (FEM: Método de elementos Finitos)
CFD:	Computational fluid dynamics (CFD: Dinámica de Fluidos Computacional)

INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la industrialización de los procesos productivos han surgido varios cambios drásticos o revolucionarios de la forma en cómo se realizan las cosas (tanto de forma productiva, como de filosofía y visión empresarial) estos cambios son llamados “Revoluciones” hasta la fecha se cuentan 4, cada cambio ha llevado a un aumento considerable en la productividad.

Se puede decir que las primeras revoluciones y con énfasis en la tercera que llevo a la integración de automatización a los procesos, se han basado en potenciar el desempeño de los equipos de forma individual, Con la cuarta revolución industrial, también llamada industria 4.0 se pretende crear procesos industriales complejos, donde los equipos que lo conformen estén conectados entre sí, y tengan la capacidad de optimizar tiempos y recursos, incluso aplicando tecnologías como IA y Deep Learning para llegar a tomar decisiones de forma autónoma.

Las revoluciones industriales van de la mano con los avances tecnológicos, pasando desde la manufactura clásica a la manufactura automatizada hasta llegar el punto que nos encontramos hoy manufactura inteligente. El mantenimiento debe mantenerse en constante cambio a la par de las nuevas tecnologías y de estas revoluciones, mejorar sus estrategias y cambiar sus enfoques para mejorar el desempeño de los activos, afrontar la cada vez mayor complejidad de los procesos, esto también lo ha llevado a sufrir “Revoluciones” para abordar los cambiantes requerimientos de las industrias e integrando las nuevas herramientas tecnológicas.

En las etapas tempranas el mantenimiento era puramente reactivo, lo cual tenía altos costos por el impacto en la producción (tiempos de detención Altos), luego paso a una mantención más preventiva donde se integraban distintas estrategias de mantenimiento programado, con cada avance tecnológico el volumen de datos recolectados aumento, en variedad y complejidad, en especial con la llegada de la automatización y la filosofía lean lo que llevo a una rama nueva de tipos de mantenimiento entre las cuales destaca RCM y TPM.

Con el objetivo de optimizar recursos, el paradigma de mantenimiento siguió avanzado desde la detección, pasando a mantenimientos del tipo Predictivo *diagnosis* (CBM+) hasta llegar a la *prognosis* Mantenimientos prescriptivos (PHM), las nuevas tecnologías por fin se están acercando al estado holístico de O&M lo que permite por ejemplo mediante un gemelo digital ver como envejece nuestro activo en diferentes condiciones de uso mientras la parte física de este gemelo se mantiene siempre joven.

En el presente trabajo de investigación, se expondrán los potenciales beneficios de la implementación de tecnologías como Digital Twins e IOT, dentro de las actividades de mantenimiento. La aplicación de estas tecnologías podría potencialmente permitir tomar el control

completo del ciclo de vida (TLCSM), los gemelos digitales de más alto nivel están preparados para tomar sus propias decisiones aplicando IA y llegar a un estado de Mantenimiento Predictivo/Prescriptivo en los casos más vanguardistas Mantenimiento autónomo.

OBJETIVO GENERAL

Investigar uso de softwares y tecnologías IOT, en conjunto con simulación para el fortalecimiento del análisis causa raíz y orientar su uso en mantenimiento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diferenciar tecnologías digital Twins e IOT disponibles en la actualidad, identificando aplicaciones y ventajas orientando su uso a mantenimiento.
- Analizar normativas sobre monitorio de condición y examinar alternativas de softwares disponibles en el mercado .
- Proponer uso de tecnologías digital Twins en conjunto con simulación para fortalecer el análisis causa raíz.

CAPÍTULO 1: **ANÁLISIS Y CONCEPTOS DE TECNOLOGIAS DIGITAL TWIN**

1.1. DEFINICION DEL CONCEPTO DIGITAL TWIN

Los gemelos digitales son modelos virtuales ideados con el fin de reflejar con la mayor precisión posible un objeto físico real, Esto se logra mediante la recopilación de datos derivados de distintas fuentes (sensores, data histórica, etc.), Estos datos se transmiten y procesan en conjunto con modelos 3d y se genera representaciones virtuales emulando condiciones reales de los objetos en un entorno virtual dinámico. Los objetos de estudio pueden ser productos, procesos, máquinas, dispositivos o componentes, o un entorno productivo completo, esto permite trabajar sobre esta representación digital sin afectar el proceso real, en el desarrollo de nuevas aplicaciones de monitorización, simulación u optimización, una vez generada esta información nueva se puede aplicar retroalimentando nuevamente al objeto físico original.

Todo esto en conjunto de medios de automatización e intercambio de datos en tecnologías de fabricación, incluido Internet of Things (IoT), computación en la nube, Cyber-Physical Systems (CPS), data y big data análisis, simulación y realidad aumentada, esta tecnología encaja en el concepto de innovaciones dentro de la Industria 4.0

El Diagrama 1-1 muestra la arquitectura básica de un sistema de gemelo digital, Según la finalidad con la que se haya proyectado el gemelo digital el tipo y el nivel, se pueden encontrar variaciones de esta arquitectura.

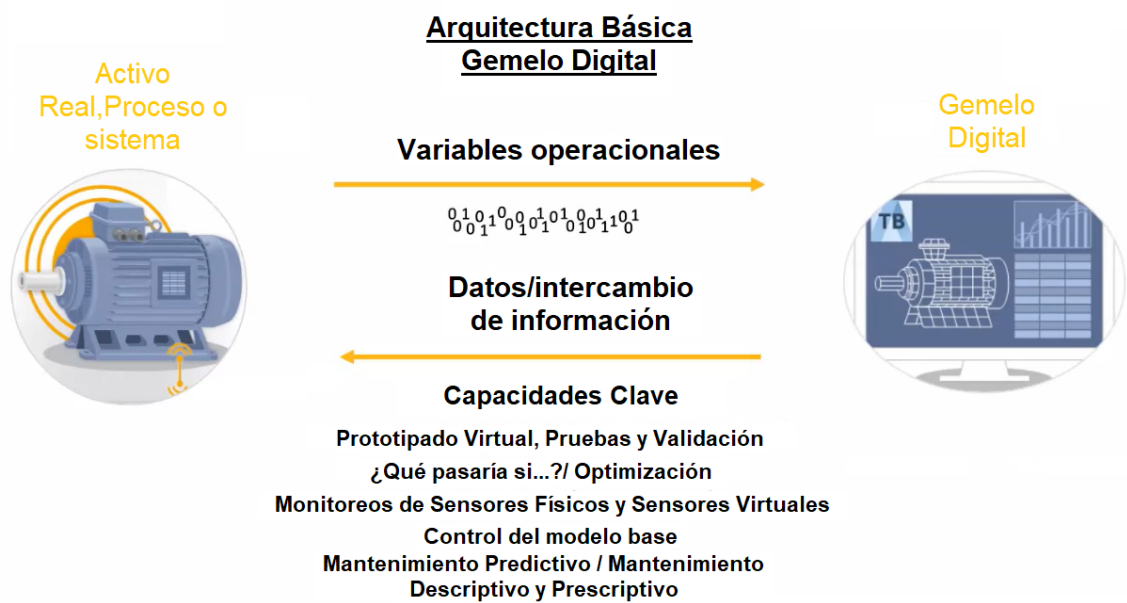


Diagrama 1-1 "Arquitectura básica Gemelo Digital"

(Fuente: Elaboración propia a partir de Diagrama ANSYS TWIN BUILDER)

1.2. CONTEXTO INDUSTRIA 4.0

A la fecha se identifican claramente tres revoluciones industriales ya completas. La Primera Revolución Industrial utilizó la fuerza de vapor para mecanizar la producción a través de la invención de la máquina de vapor. La Segunda Revolución Industrial trajo la producción en masa con energía eléctrica y en la Tercera Revolución Industrial automatizo la producción a través de la electrónica y la tecnología de la información. Ahora, para la mayoría, estamos experimentando el cuarto gran periodo de revolución.

En la siguiente imagen se aprecian las revoluciones en una línea de tiempo. Un punto destacable es la tendencia de disminución del tiempo entre revoluciones. Pasaron 100 años aproximadamente entre las primera tres revoluciones, pero Solo tomó alrededor de 40 años llegar de la tercera a la cuarta. Es posible que para llegar a la quinta se tarde menos de 40 años.

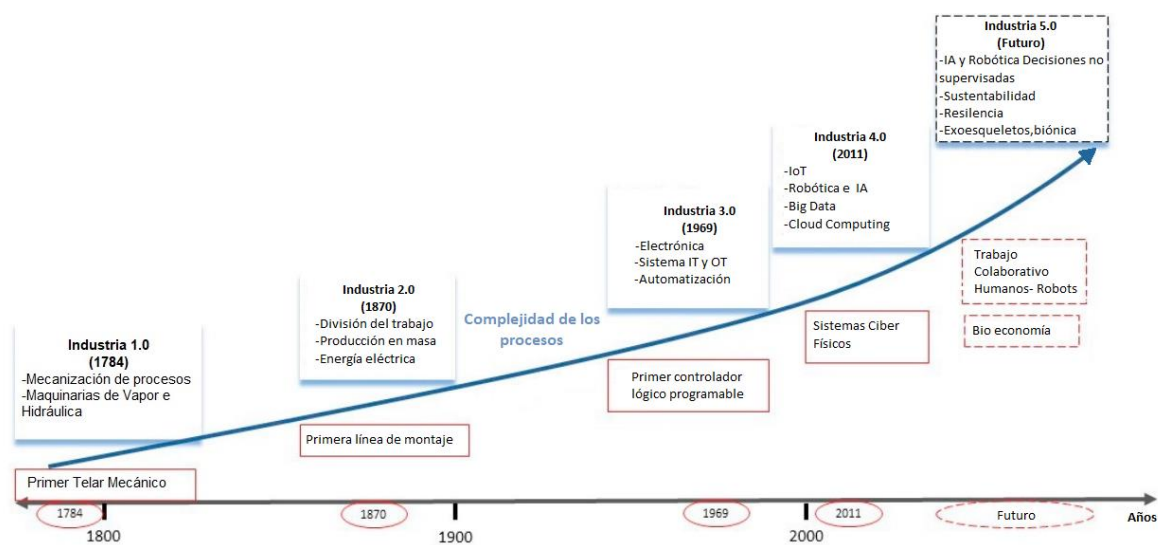


Ilustración 1-1 " Proyección 5ta Revolución industrial "

(Fuente: Artículo “Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison)

El concepto de la cuarta revolución industrial o industria 4.0. Fue acuñado en el marco de la estrategia de alta tecnología del Gobierno federal de Alemania y describe una producción industrial en la que todos los productos y máquinas están interconectados entre sí digitalmente. En el 2011, esa estrategia fue presentada en la Feria de Hannover, la feria industrial más importante de Alemania, por primera vez a un vasto público, Los fundamentos sobre los que se levanta esta

revolución serían la irrupción de las nuevas tecnologías que han cambiado radicalmente todos los aspectos de la vida actual tanto sociales y económicos, y afecta, por tanto, a cada sector industrial.

Según Henrik Von Scheel Originador del concepto Industria 4.0 él denomina esta revolución como el periodo más disruptivo en la historia humana y en sus propias palabras “La cuarta revolución industrial es la confluencia de tres mundos: el físico, el digital y el industrial. Cambia nuestra economía, cambia la forma en que interactuamos, en cómo consumimos productos.”

Este nuevo paradigma industrial se basa principalmente en la integración de tecnología como pilar fundamental, entre las que podríamos destacar el Internet de las Cosas, el Cloud Computing, la robótica, la Inteligencia Artificial y el Big Data, pero también de la Impresión 3D, Sistemas Ciber físicos (CPS) o Gemelos digitales, la Realidad Virtual, Aumentada y Mixta. La idea principal de la integración de tecnologías es permitir la creación de procesos óptimos y eficientes para impulsar una mayor productividad.

1.2.1. CPS Y GEMELOS DIGITALES

Vistos en un sentido amplio, los CPS y los DT tienen características similares, y ambos describen la fusión de los mundos cibernético y físico. Sin embargo, CPS y DT no son idénticos.

Ambos términos se propusieron alrededor del Mismo tiempo. Sin embargo, el DT no recibió mucha atención hasta 2012, cuando la NASA y la Fuerza Aérea de EE. UU. comenzaron a utilizar el concepto DT. En contraste, desde que fue propuesto por Helen Gill en la National Science Foundation, CPS recibió atención de la academia y los gobiernos, con Industria 4.0 enumerando CPS como su núcleo. Sin embargo, después de varios años de desarrollo, los DT se hicieron populares.

Si se revisa la literatura, los CPS son mayormente nombrados en artículos de categoría científica, mientras que los DT es el término de mayor frecuencia en la categoría de ingeniería. En la composición, tanto CPS como DT involucran el físico mundo y el mundo cibernético. A través de la interacción ciber física y control, ambos permiten una gestión precisa y mejor y funcionamiento del mundo físico. En términos de implementación de funciones de CPS y DT, los sensores y actuadores permiten la interacción entre los mundos físico y cibernético para los datos y controlar el intercambio. En comparación, los modelos juegan un papel importante papel en un DT para ayudar a interpretar y predecir el comportamiento del mundo físico basado en varios datos. Por lo tanto, los sensores y actuadores pueden considerarse como elementos centrales en CPS, mientras que los modelos y los datos son los elementos centrales en un DT. Desde la perspectiva de jerarquía, ambos se pueden dividir en el nivel de unidad, nivel de sistema, y nivel planta. Sin

embargo, dado que tienen diferentes énfasis elementales, CPS y DT tienen componentes diferentes. En cada nivel. Finalmente, a través de la integración con la nueva TI, CPS y los DT pueden mejorar las capacidades de los sistemas de fabricación, ofreciendo soluciones optimizadas, que contribuyen a la implementación de la fabricación inteligente.

Según la National Science Foundation “Un sistema ciber físico es el resultado de la integración de Procesamiento de datos y tecnologías de censado IoT a un proceso físico. Se trata de “sistemas construidos a partir de la integración perfecta de la computación y los componentes físicos. Los avances en CPS permitirán superar a los simples sistemas integrados actuales en cuanto a capacidad, adaptabilidad, escalabilidad, resiliencia, seguridad y usabilidad” (NSF, s.f.).

Esta nueva definición nos ayuda a separar ambos términos que en esencia son lo mismo, pero un CPS es un gemelo digital integrado al sistema físico desde su concepción es decir desde su creación se puede decir que este activo integra tanto la digitalización que refleja su parte física de fábrica, en cambio, un gemelo digital es una forma de digitalizar e integrar lo físico y digital de equipos que no contaban con esta opción de fábrica este integrando sensores o aprovechando los del equipo, es una digitalización de un activo after market o después de la concepción y fabricación del activo, y aunque en esencia ambos tengan las mismas capacidades y en la literatura sean tratados como sinónimos la diferencia fundamental es el momento de integración de la parte digital.

Las capacidades de los CPS están limitadas a sus pre-configuraciones y como ventaja un gemelo digital se integra en plataformas que se actualizan constantemente, Por lo tanto, admite una serie de funcionalidades, como la duplicación del sistema, la optimización de parámetros, la predicción del comportamiento y simulaciones.

Estos son algunos ejemplos de CPS y gemelos digitales:

Ejemplo de CPS:

Un robot industrial que se utiliza en una planta de fabricación para ensamblar piezas de automóviles. El robot tiene sensores y actuadores que le permiten moverse y realizar tareas según las instrucciones de un programa de computadora.

Ejemplo de gemelo digital:

Una representación virtual del motor de un avión que se utiliza para estudiar cómo funciona el motor en diferentes condiciones y para identificar posibles problemas antes de que ocurran en el motor físico.

Brevemente, la irrupción de estos activos inteligentes, ya sean DT o CPS, ha cambiado la manera clásica de como operar una fábrica tanto en su fabricación, mantención y operación. Producto de la integración de estos activos inteligentes, el control de los Sistemas de Manufactura (MS) necesita establecer estructuras para resolver requerimientos incipientes y complejos. Una razón importante es que los arreglos jerárquicos tradicionales no cubren las nuevas necesidades en

Automatización Industrial, ni las demandas compuestas del mercado global. En este caso, la iniciativa alemana Industrie 4.0 (I4.0) propone entornos de fabricación inteligente a través del desarrollo e implementación industrial completa de Cyber Physical Production Systems (CPPS). Los CPPS consisten en elementos independientes y cooperativos integrados al Internet Industrial de las Cosas para crear Fábricas Inteligentes.

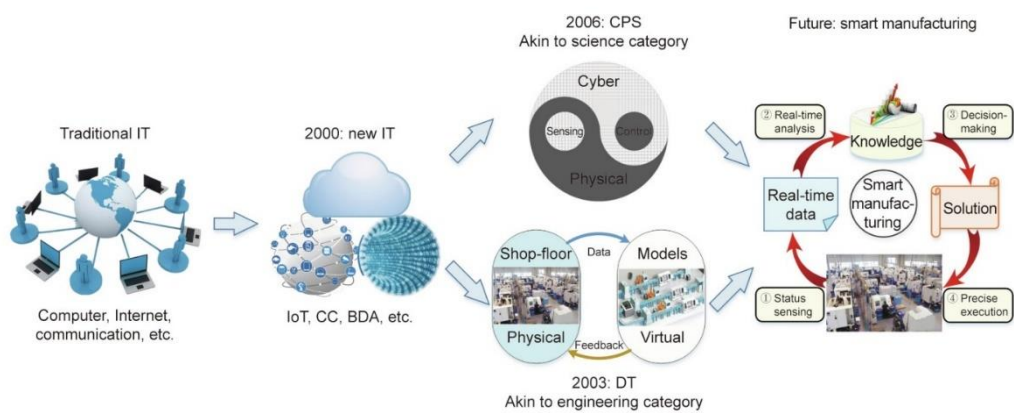


Diagrama 1-2 " Relación DT/CPS "

(Fuente: Artículo “Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison)

1.2.2. ORIGEN DEL CONCEPTO DT BACKGROUND

Aunque el término de gemelo digital es relativamente nuevo existen varias reseñas que se refieren al concepto con otro nombre, algunos de los conceptos más destacables que se consideran los precursores de la tecnología son los siguientes

La idea central de “Digital TWINS” fue en esencia descrita por el tecnólogo David Gelernter, en su libro de 1991 titulado “Mirror Worlds” libro adelantado a su tiempo donde especulaba sobre los “Mundos espejos” que en palabras simples son representaciones de computadora de por ejemplo una ciudad completa, y en esta imagen de la ciudad se detallan patrones de movimiento de tráfico en tiempo real, o una imagen de una corporación remota que con solo verla entrega detalles de todo su estado, al interactuar con las imágenes, interactúas con la realidad al mismo tiempo.

Se dice que este libro también fue donde se predijo la creación de la Word wide web, Mirror Worlds y los trabajos anteriores de Gelernter tuvieron una influencia directa en el desarrollo por parte de Sun Microsystems del lenguaje de programación Java.

En el año 2002, El doctor Michael Grieves (Docente en la universidad de Michigan), en el contexto de una conferencia de la Sociedad de Ingenieros de Fabricación en Troy, Michigan. Fue el primero en asociar el término de gemelo digital a la fabricación llamándolos como “Mirrored Spaces Models” (Diagrama 1-3) estos modelos de espacios reflejados en una primera instancia fueron propuestos para su utilización en la gestión de ciclo de vida de un producto PLM.

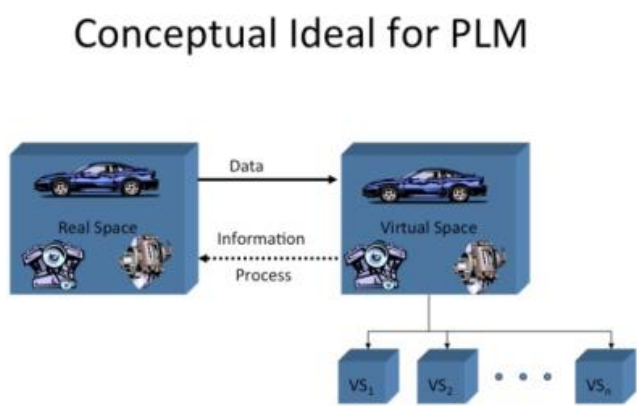


Diagrama 1-3 " Conceptualización ideal para PLM "

(Fuente: Parte de la presentación original del Dr. Michael Grieves Año 2002.)

El doctor Michael Grieves en su concepto de modelos de espacios reflejados, describió elementos que sustentan los modelos modernos de DT, incluido la coexistencia del espacio real y el digital en conjunto con una comunicación bidireccional, esta consistía en que el producto físico enviaba información sobre sí mismo y el entorno físico al producto virtual y el producto virtual enviaba comandos de control al producto físico. El concepto se adelantó a su tiempo, ya que aún no se contaban con la tecnología y se necesitarían números avances para la implementación y el uso real de tales modelos.

1.2.3. CONCEPTO DE “DIGITAL TWINS” NASA

La idea central de utilizar un entorno digital como medio para estudiar su parte física se trabajó mucho antes de forma secreta en la NASA, Esta agencia fue pionera en el uso e implementación de esta tecnología durante sus misiones de exploración espacial en la década de 1960 en el contexto de la carrera espacial durante la guerra fría, se usaban modelos terrestres replicando cada nave espacial durante el viaje con fines de estudio y simulación, esto por parte de controladores de vuelo que apoyan y monitorean todos los aspectos de la misión usando la tecnología disponible en ese momento enviando comandos mediante telemetría para corregir curso

o intervenir en caso de que fuese necesario. Este tipo de tecnología y todo lo relacionado con avances de la misión se mantuvo en secreto en el contexto de ganar la carrera espacial.

En el año 2010 La Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) Termino haciendo público y nombrando el concepto gemelo digital tal y como lo conocemos hoy, avanza esta tecnología desde la conceptualización a la aplicación práctica. El término de gemelo digital de la NASA fue desarrollado para mejorar las simulaciones de las naves espaciales por el ingeniero John Vickers, Definieron los gemelos digitales como “una simulación probabilística, multiescala y multifísica integrada de un vehículo o sistema que utiliza los mejores modelos físicos disponibles, actualizaciones de sensores, historial de flota, etc., para reflejar la vida de su gemelo volador”.

Tomando el desarrollo conceptual de la NASA, la fuerzas aéreas de EE.UU. adopto la tecnología para el diseño, mantenimiento y predicción de condiciones de uso de sus aeronaves

Una línea de tiempo para demuestras el desarrollo de concepto de lo que ahora se conoce como gemelo digital se puede ver en la siguiente ilustración:

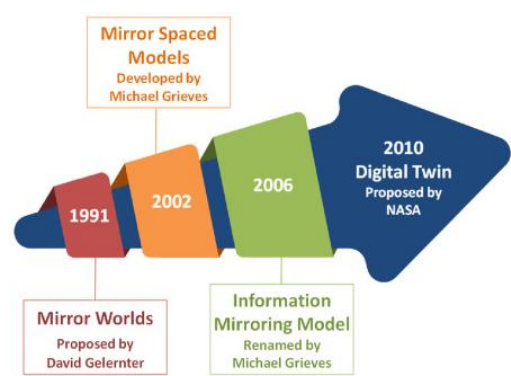


Ilustración 1-2 " Evolución del concepto DT en el tiempo "

(Fuente: Artículo “Digital twin in hydrocarbon industry” Petroleum Research 11/2021)

1.3. CICLOS DE SOBREEEXPECTACIÓN DE GARTNER (CICLO DE VIDA TECNOLÓGICO)

Gartner INC. es una empresa estadounidense experta en Tecnologías de la información, entre sus servicios más destacados están consultorías, mentorías y estudios sobre impacto de implementación de tecnología. Incluye entre su cartera de clientes a algunas de las empresas más grandes del mundo, incluyendo agencias del gobierno estadounidense, desde el año 1995 la compañía implemento el hype cycles para caracterizar el entusiasmo sobredimensionado y la

decepción que se da habitualmente al malinterpretar el impacto en la introducción de nuevas tecnologías.

Cuando salen a la luz nuevas tecnologías y estas prometen un grado de avance importante o directamente un cambio disruptivo en su campo, estas tecnologías suelen generar grandes expectativas, para distinguir una exageración de expectativas, de una tecnología comercialmente viable, Gartner empresa líder en consultorías e investigación tecnológica, creó representaciones gráficas que ellos denominan “Hype Cycle” *“Un ciclo de sobre expectativa es una representación gráfica en forma de curva de la madurez, adopción y aplicación comercial de una tecnología específica, que es potencialmente relevante para su aplicación comercial real y así aprovechar nuevas oportunidades de negocio.”* (Gartner, s.f.).

Como se observa en el Grafico 1-1 la curva del Hype cycle ayuda a visualizar las fases clave del ciclo de vida de una tecnología. Un análisis detallado de este curva permite visualizar en qué fase se encuentra una tecnología de interés y estimar si es acertado invertir en ella.



Gráfico 1-1 " Fases de un Hype Cycle de Gartner "

(Fuente: Artículo WEB Gartner INC 2022)

1.3.1. FASES DE UN HYPE CYCLE

- **“Lanzamiento o Desencadenante de la innovación:** Un avance tecnológico potencial se toma como punto de partida del ciclo. Las primeras historias de prueba de concepto y el interés de los medios desencadenan una publicidad significativa. En esta etapa a menudo no existen productos utilizables y la viabilidad comercial no está probada.
- **Pico de expectativas sobredimensionadas:** la publicidad temprana produce una serie de historias de éxito, a menudo acompañadas de decenas de fracasos. Algunas empresas toman medidas; muchos no.

- **Abismo de desilusión:** el interés se desvanece a medida que los experimentos y las implementaciones fallan. Los productores de la tecnología se sacuden o fracasan. Las inversiones continúan solo si los proveedores sobrevivientes mejoran sus productos a satisfacción de los primeros usuarios.
- **Rampa de consolidación:** más ejemplos de cómo la tecnología puede beneficiar a la empresa comienzan a cristalizar y se vuelven más ampliamente entendidos. Aparecen productos de segunda y tercera generación de proveedores de tecnología. Más empresas financian pilotos; las empresas conservadoras siguen siendo cautelosas.
- **Meseta de productividad:** la adopción generalizada comienza a despegar. Los criterios para evaluar la viabilidad de los proveedores están más claramente definidos. La amplia aplicabilidad y relevancia de la tecnología en el mercado está dando sus frutos” (Gartner, s.f.).

1.3.2. APLICACIONES DE HYPE CYCLE

Este método desarrollado por Gartner sirve como una fuente de información para poder gestionar la implementación de estas tecnologías, previendo cuál de estas puede causar un mayor impacto positivo, teniendo en cuenta el negocio y la cantidad de riesgo que está dispuesto a asumir el cliente objetivo dentro del contexto industrial alineando los objetivos específicos del negocio.

La curva va acompañada de una consultoría específica por cliente, permite responder preguntas como ¿Deberías anticiparte a los demás? Una inversión temprana, pero informada permite gestionar los riesgos, pero aun así poder obtener los beneficios de una adopción temprana de las tecnologías. Si se opta por una inversión muy temprana existe mayor riesgo de fracaso, ya sea por el descubrimiento de alguna tecnología superior o cambio de paradigma empresarial, si se opta por un enfoque moderado tomando en cuenta un análisis costo/beneficio más afianzado puede ser demasiado tarde en el contexto industrial significa quedarse atrás.

Aun así, existen empresas que deciden esperar a que las tecnologías sean comprobadas y se alcance su nivel máximo de maduración para la adopción las tecnologías basándose en resultados tangibles de sus competidores dentro del mercado.

1.3.3. HYPE CYCLES Y DIGITAL TWINS

Si se continuara con la cronología del origen de esta tecnología, en el año 2017 La tecnología digital Twins se volvió tan relevante que Gartner la incluyó en su reporte de tecnologías emergentes (Gráfico 1-2).

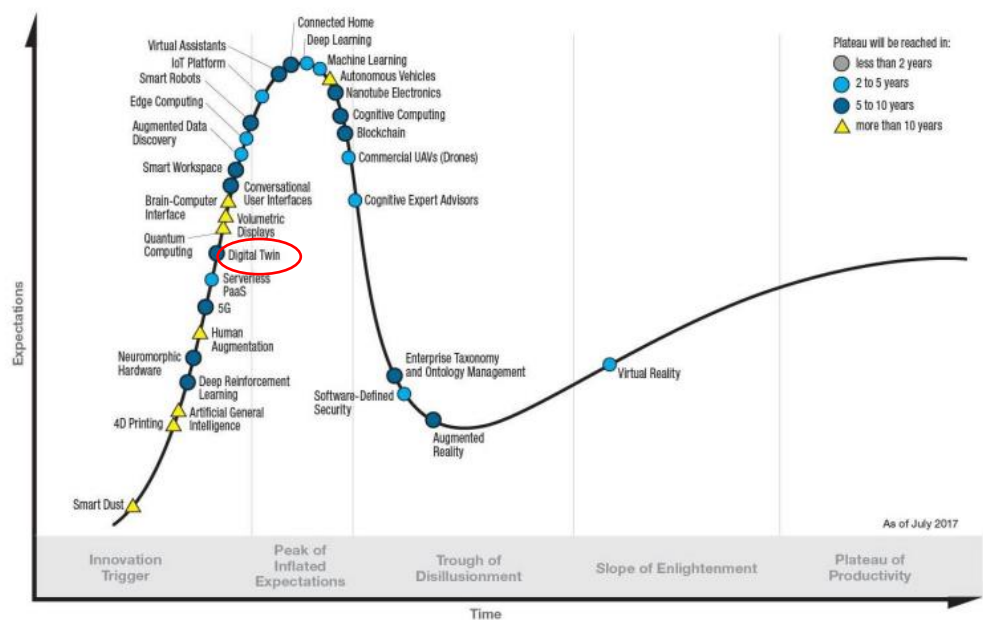


Gráfico 1-2 " Hype Cicle de tecnologías emergentes Año 2017 "

(Fuente: Gartner Hype Cycle For emerging Technologies 2017, Gartner Julio 2017)

En la versión de hype cycle del año siguiente 2018, digital Twins alcanzo el punto máximo de la cresta de expectativas y se proyecta su maduración en un periodo de entre 5 a 10 años (a la aplicabilidad real y relevancia en el mercado).

El análisis de Gartner Es relevante dado que presenta las tecnologías emergentes y extrae conocimientos de más de 2000 tecnologías en un sucinto conjunto de alto potencial. La mayoría de las tecnologías tienen múltiples casos de uso, pero los responsables de arquitectura empresarial y de innovación tecnológica deben priorizar aquellas con el mayor beneficio potencial para su organización en los años subsiguientes y hasta la fecha la tecnología Digital Twins se ha hecho presente en múltiples ocasiones en los hype cycles nombrando soluciones basadas en digital Twins como Digital Gestión de operaciones, ciudadano digital, gemelos digitales de personas, El gemelo digital de la cadena de suministro, etc.

1.4. DIGITAL TWIN E INDUSTRIA 4.0

En el año 2017, un artículo titulado “A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems” cubrió el papel de los Digital Twins dentro de la Industria 4.0 con una descripción general de definiciones existentes de los gemelos digitales desarrolladas hasta el año 2016, muchas de estas definiciones fueron tomadas de la industria de la construcción, recopilación que se da de las definiciones y conceptos más tempranos de la tecnología. Conceptos de la industria 4.0 que apunta a la conexión entre equipos usando tecnologías como IIoT y análisis de datos con

IA se vinculan a la tecnología de gemelos digitales porque esta agrupa las tecnologías de vanguardia, para llevar las fábricas a un nuevo nivel.

En los años siguientes se observó un crecimiento en el número de artículos de técnico-científicos, Analizando las publicaciones encontradas en Science Direct que contienen termino Digital Twin (artículos en inglés) Tanto en el título como en las palabras clave, sin embargo, el aumento más significativo se observó en el año 2020 cuando Se publicaron el 55% de todas las reseñas sobre DT.

En el Gráfico 1-3 se puede observar la misma tendencia al realizar una búsqueda más detalladas de los términos “Digital Twin Maintenance” desde el año 2019 se observa un aumento considerable de las publicaciones, esta tendencia puede ser una consecuencia de las numerosas áreas temáticas de aplicación de DT, Además, muchas publicaciones presentan un análisis transversal de la industria. Esto es considerado también una causa-efecto de la pandemia, donde se vio la necesidad de operar y tener mayor grado de control de las instalaciones a distancia.

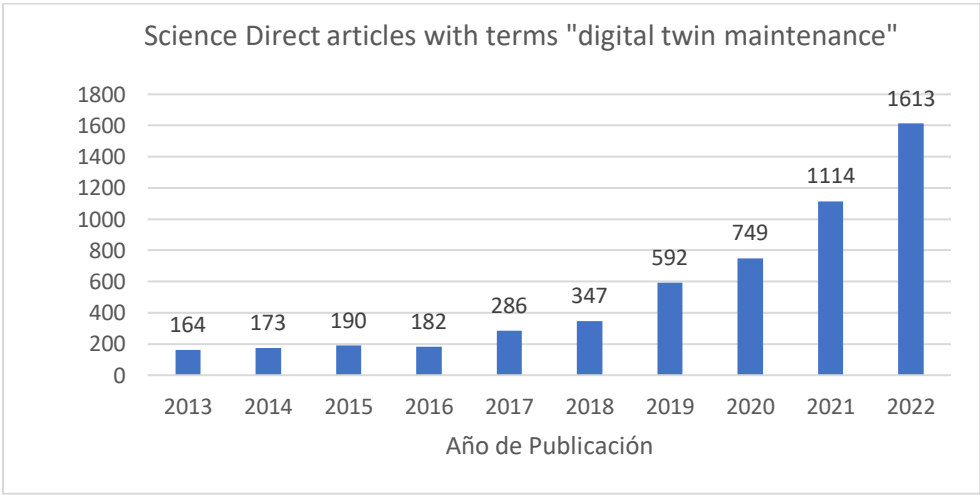


Gráfico 1-3 " Grafico N° de publicaciones VS Año "

(Fuente: elaboración propia a partir de artículos publicados en Science Direct actualizado al 22/11/2022)

Un artículo publicado en la revista Forbes en el año 2020 posiciona la tecnología de digital Twins en la novena posición de las 25 tecnologías que definirán la próxima década, Si se analiza la descripción general de las aplicaciones contemporáneas de Digital Twins. Curiosamente, más del 50% de todos los artículos de revisión identificados se centran en gran medida en las aplicaciones de fabricación. Este puede ser una consecuencia del hecho de que muchas máquinas y productos dentro de la industria manufacturera tienen requisitos previos suficientes para usar DT, por ejemplo, debido a la conexión de las máquinas de producción a los sistemas de TI.

1.5. INDUSTRIA Y MERCADO DE LOS GEMELOS DIGITALES

Según lo expuesto anteriormente, la historia de los gemelos digitales lleva un largo tiempo, ya paso su nacimiento y en términos tecnológicos se podría decir que está en su infancia, según Gartner, el potencial de esta tecnología se espera a mediados del año 2028, aun así, en la actualidad se ha visto un explosivo aumento del uso de esta tecnología, el efecto de la pandemia cambio el paradigma de muchos empresarios, en temas como home office, jornadas flexibles, etc. Esto de la mano de la tecnología, los gemelos digitales apuntan, aparte de todas las capacidades de analítica y predicción al trabajo remoto, permiten tener acceso, visualización y control de una parte productiva solo con un ordenador.

1.5.1. INDUSTRIAS

En la actualidad, Los gemelos digitales se benefician del hecho de que existe una gran cantidad de datos generados por máquinas, especialmente en el ámbito de la producción, pero no solo este sector se ve beneficiado, existen “diversos tipos de proyectos se benefician específicamente del uso de modelos digitales:

- Proyectos de gran envergadura como Edificios, puentes y otras estructuras complejas sujetas a estrictas reglas de ingeniería.
- Proyectos mecánicamente complejos Turbinas a reacción, automóviles y aviones. Los gemelos digitales pueden ayudar a mejorar la eficiencia dentro de maquinaria complicada y motores gigantes.
- Empresas de generación de energía, Centrales eléctricas, termo eléctricas plantas generadoras, Equipos de poder, Esto incluye tanto los mecanismos para generar energía como para transmitirla.
- Proyectos de manufactura Los gemelos digitales se destacan por ayudar a optimizar la eficiencia de los procesos, como los encontrados en entornos industriales, con sistemas de máquinas que funcionan conjuntamente” (IBM, s.f.).

Las industrias que se benefician en mayor manera con el uso de DT son las que abarcan productos o proyectos de grandes envergaduras, como lo son:

- ✓ Ingeniería (sistemas)
- ✓ Fabricación de automóviles
- ✓ Producción de aviones
- ✓ Minería
- ✓ Construcción de edificios
- ✓ Fabricación
- ✓ Equipos de generación de energía

1.5.2. MERCADO

“El mercado de gemelos digitales está en rápida expansión e indica que, si bien los gemelos digitales ya se utilizan en muchas industrias, su demanda seguirá aumentando durante algún tiempo” (IBM, s.f.).

Un reporte confeccionado por la consultora Markets and Markets titulado “Digital Twin MARKET dividido por industrias, compañías y aplicaciones (Mantenimiento predictivo, optimización del negocio), Industrias (Aeroespacial, Automotor & Transporte, Salud, Infraestructura, Energía & Utilidades) , Según este reporte en el año 2022, el mercado de gemelos digitales se valoró en USD 6,9 Billones. Estos analistas de la industria especulan que podría seguir aumentando drásticamente hasta al menos el año 2027, subiendo a un valor estimado de USD 73,5 Billones. Estimando una tasa compuesta de crecimiento anual (CAGR) del 60.6% desde el 2022 al 2027” (Markets&markets, s.f.).

Este reporte también menciona el papel que jugó la pandemia en el aumento y la expansión del mercado, otro de los aspectos claves que aborda este reporte es la adopción de tecnología según ubicación geográfica, dejando como principal ganadora a la región de Norteamérica, donde la tecnología es aplicada por algunas de las mayores compañías del mundo (esto explica también por qué la mayor parte de la literatura científica y de vanguardia está en este idioma) esta región alberga empresas como Microsoft (US), IBM (US), Amazon WEB Services (ASW) (US) y General Electric entre otras. También alberga las compañías que según el reporte acapararon la mayor parte de esta tecnología aplicaciones en el sector aeroespacial con compañías como Bell Flight (US), Boeing Aerospace (US), Lockheed Martin (US) y Boeing (US), al integrar gemelos digitales estas empresas lograron optimizar su producción y reducir el DOWNTIME y los costos operacionales.

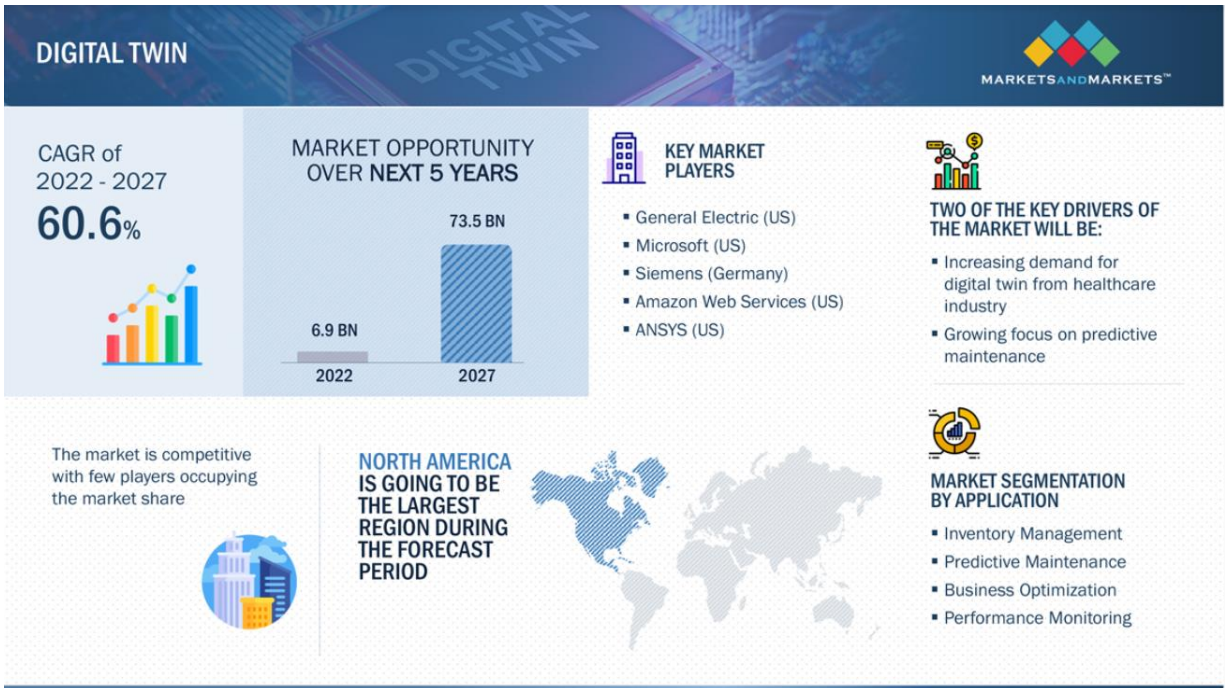


Ilustración 1-3 " Extracto Reporte de Expansión mercado Digital Twins "

(Fuente: Reporte DIGITAL TWIN MARKET: MARKETS AND MARKETS 2022)

Según este mismo Reporte, el segmento de aplicaciones en mantenimiento predictivo tiene el tamaño más grande del mercado de gemelos digitales durante el período actual, y se espera que mantenga esa posición en el periodo pronosticado.

El hecho de que cada organización necesite su equipo clave para operar con la máxima eficiencia y utilización para obtener el retorno de los gastos de capital es la causa fundamental del surgimiento de aplicaciones de mantenimiento predictivo para gemelos digitales. Con esta tecnología, las empresas se están enfocando en desarrollar un modelo de mantenimiento predictivo que optimice el ciclo de mantenimiento y logre un equilibrio entre el mantenimiento correctivo y preventivo.

1.6. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE LOS GEMELOS DIGITALES

1.6.1. **VENTAJAS Y BENEFICIOS**

- Mejor Investigación y Desarrollo (I + D)

“El uso de gemelos digitales permite una investigación y un diseño de productos más eficaces” (IBM, s.f.), estudiando la gran cantidad de datos, puede generar modelos virtuales y proyectar

distintos escenarios de producción. Con estas simulaciones se puede ver cómo reacciona el producto o las instalaciones y generar información para conducir la toma de decisiones con valores proyectados antes de comenzar la producción real, ahorrando tiempos en prototipado físico y tiempos destinados a pruebas de producción con productos reales.

- Mayor eficiencia

La mezcla de data de diferentes fuentes, combinado con la información censada en tiempo real permite optimizar la eficiencia y conseguir un mejor rendimiento de los equipos, Incluso después de que un producto ya entro a su fase de fabricación, “los gemelos digitales pueden ayudar a reflejar y monitorear los sistemas de producción en tiempo real, con el objetivo de garantizar y mantener la máxima eficiencia durante todo el proceso de fabricación, reduciendo tiempos de inactividad.

- Se hace cargo de todo el Ciclo de vida

Los gemelos digitales pueden incluso ayudar a los fabricantes a decidir qué hacer con los productos que llegan al final del ciclo de vida del producto y necesitan recibir un procesamiento final, a través del reciclaje u otras medidas. Mediante el uso de gemelos digitales, pueden determinar qué materiales de los productos se pueden recolectar” (IBM, s.f.).

- Capacidades predictivas

Los gemelos digitales según el tipo y el nivel de madurez “tienen la capacidad de ofrecer una visión completa y digital de una planta de fabricación” (AWS, s.f.), o unas instalaciones industriales, incluso si un activo está formado por miles de piezas. Los sensores IIoT supervisan variables como la temperatura, vibraciones o rpm , e “indican los problemas o fallos a medida que se producen. Es posible tomar medidas ante la primera señal de problemas en lugar de esperar a que el equipo se averíe por completo” (AWS, s.f.), esto gracias a sus capacidades de combinar las 3 escalas de mantenimiento predictivo como son RCM, CMB y PHM.

- Supervisión remota

“El carácter virtual de los gemelos digitales permite supervisar y controlar las instalaciones de forma remota (Como lo hace SCADA a nivel local). La supervisión remota también reduce el número de personas que tienen que controlar los equipos industriales potencialmente peligrosos” (AWS, s.f.).

1.6.2. DESVENTAJAS.

“Si bien los gemelos digitales son apreciados por sus múltiples ventajas, su uso no está garantizado para todos los fabricantes o productos creados. No todos los objetos son lo suficientemente complejos y no todas las líneas de producción generan el flujo intenso y regular

de datos de sensores que requieren los gemelos digitales. Tampoco siempre vale la pena, desde el punto de vista financiero, invertir importantes recursos en la creación de un gemelo digital” (IBM, s.f.). Esto debido a que muchas empresas no están preparadas para la transición, se necesita una arquitectura de red para respaldar toda la sensórica y equipos lo suficientemente potentes para el análisis, etc.

Otra desventaja es que para la implementación de un gemelo digital se necesita un equipo multidisciplinario de expertos, según la finalidad por ejemplo un experto en sensores y arquitectura de IoT, un experto en análisis de datos, operadores e ingenieros a cargo del equipo objetivo, un experto en la solución de software o plataforma soporte del gemelo digital que haga converger todos estos actores, expertos en simulación, mantenedores, etc.

Una de las ventajas más importantes detectadas es la gran cantidad de información que existe, esto tiende a generar confusión y falsas expectativas, muchas empresas venden soluciones de sensórica aludiendo a gemelo digital cuando en realidad son soluciones de IoT o monitoreo de condición, conectados a un servidor externo para el análisis de data y generar el análisis a distancia, esto es solo una parte de la capacidad de un gemelo como tal. También se tiende a confundir conceptos entre los gemelos de construcción BIM y los gemelos industriales. Otra tendencia que genera desventaja es que todavía no existe un plan o metodología de trabajo en gemelos de forma estándar (Como la metodología BIM), lo que permitiría, aparte de la Inter operatividad de datos entre distintos softwares generar un orden en la forma en la que se trabajan e implementan estos modelos, procedimientos etc.

1.7. TIPOS DE GEMELOS DIGITALES

Existe mucha confusión con el término de gemelo digital, esto se debe a como pudimos ver antes, los amplios campos de aplicación, empresas y proveedores de softwares que están implementando la tecnología, cada uno de estos actores crea sus propias definiciones y tipos de gemelos digitales según el nivel de desarrollo del producto. “La mayor diferencia entre estos gemelos es el área de aplicación. Es común que coexistan diferentes tipos de gemelos digitales dentro de un sistema o proceso” (IBM, s.f.).

Cuando se habla de gemelos digitales pensamos en una solución de software que refleja un sistema de producción de forma digital. Pero hay más que eso. El sistema de producción tenía una historia antes de que se construyera y los gemelos digitales pueden respaldar el ciclo completo de desarrollo de dicho producto, como se aprecia en la siguiente ilustración.

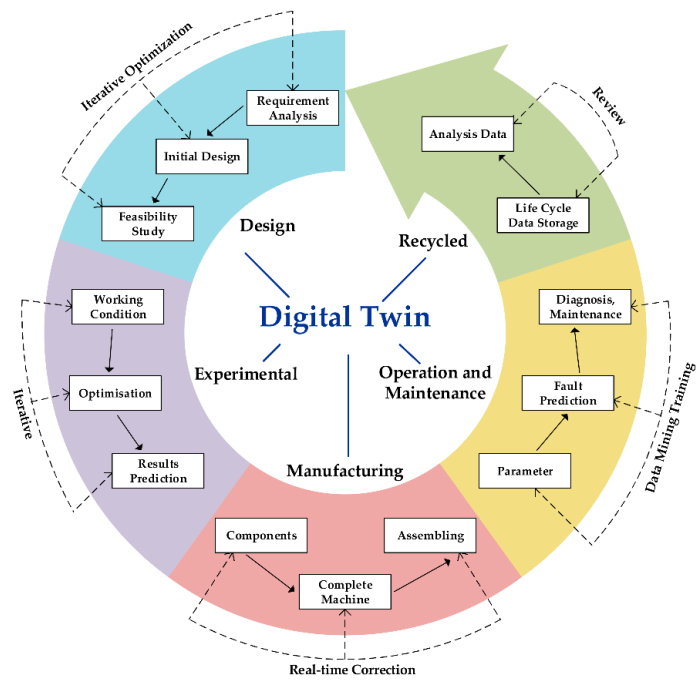


Ilustración 1-4 " Ciclo Cerrado de un Gemelo Digital "

(Fuente: Artículo Digital Twin Technologies for Turbomachinery in a Life Cycle Perspective, Repositorio MDPI)

Empresas de vanguardia se están preocupando cada día más de esto, por lo tanto, el gemelo digital se empieza a crear desde la conceptualización y las primeras etapas de diseño del producto, factores del mecanizado, almacenaje, etc. Cada etapa del proceso genera datos que pueden influir en el desempeño, por lo tanto, la visión de gemelo digital que acompañe al objeto de estudio durante su ciclo de vida se podría dividir en 3 etapas.

- Desing representa la fase de planificación del producto
- Realize representa la fase de producción del producto
- Run/Optimize representa la fase de implementación del producto.

Existe una cuarta etapa Reuse que se encarga del producto una vez termina su ciclo de vida.

Tres gemelos digitales diferentes, todos trabajando en sincronía. Es decir, los datos de un producto implementado pueden influir en la planificación y producción de la nueva versión del producto. La versión más holística apunta a generar un Gemelo integrado con los datos de todas estas etapas alimentando al gemelo en un ciclo cerrado.

1.7.1. GEMELOS DIGITALES BIM

Como una de las grandes aplicaciones de digital Twins se desarrolla en el ámbito de Arquitectura, Ingeniería y construcción, obras civiles, etc. (Para proyectos constructivos de gran envergadura), esto no es una casualidad, hace mucho tiempo se viene trabajando en una estandarización de la forma en que se trabaja y conciben estos proyectos usando una metodología denominada BIM (Building Information Modeling), esta metodología es una forma de trabajo colaborativa que acompaña los proyectos de edificación y obras civiles durante todo su ciclo de vida. Uno de los puntos fuertes de esta metodología es que busca crear interoperabilidad y estándares abiertos para los distintos softwares (lo que significa en términos simples que cualquier software de modelado es capaz de traspasar la información a otro sin perder detalles) esta metodología divide el ciclo de vida del proyecto en distintas etapas, aprovechando la información disponible en las etapas de diseño Fase (3d) en etapas posteriores se retroalimenta de este modelo para su uso ya sea en mantenimiento (7d) y actualmente (se propone) integrar gemelos digitales (10d) para crear CIM (modelos de información de la ciudad) y potenciar conceptos como Smart Citys.



Ilustración 1-5 " Propuesta de Etapas Metodología BIM "

(Fuente: Artículo Dimensiones BIM vs Usos BIM Publicado por SALVADOR MORET, en LINKED IN)

Muchos de los conceptos actuales de gemelos digitales vienen de las aplicaciones en la construcción, su nivel de madurez es muy alto, producto de la cantidad de datos que tienen estos modelos producto de la metodología, estos datos son usados y retroalimenta la generación de un gemelo digital si bien estos modelos pueden estar ligados a gestión y aplicaciones de mantenimiento esta se enfoca en el mantenimiento de las instalaciones y servicios que componen una factoría o edificio.

1.7.2. GEMELOS DIGITALES INDUSTRIALES

Para nuestro enfoque aplicaciones de mantenimiento se decidió por los siguientes tipos de gemelos digitales:

- Componentes gemelos / Partes gemelas

Los componentes gemelos son la unidad más básica del gemelo digital, estas partes están vinculadas a un sistema más grande, el ejemplo más pequeño de un componente funcional. Estas partes pueden o no interactuar directamente entre sí.

En la práctica, por ejemplo, consideremos un rodamiento de una planta de producción. Por lo tanto, este rodamiento puede tener un gemelo digital en el momento de la operación, el que modela y predice sus condiciones de funcionamiento, como el tiempo medio estimado entre fallas (MTBF) o el tiempo medio hasta la falla (MTTF). Esos datos se pueden derivar (predecir o modelar) de datos actuales (obtenidos de sensores de vibración o sonido), pero también se podrían obtener de datos durante la fase de diseño o construcción (usando un modelo basado en simulación y hacerlo correr durante un tiempo X, en conjunto con los datos del fabricante). Y, por supuesto, los hallazgos que se descubren durante la operación de la pieza pueden retroalimentarse a la fase de diseño y construcción.

Un tema que muchas veces olvidamos el tiempo es una variable que en simulación se puede modificar.

- Gemelos activos/ Producto gemelo

Un gemelo de activo es básicamente un conjunto de partes gemelas que reflejan sus interacciones. “Los gemelos de activos le permiten estudiar la interacción de esos componentes, creando una gran cantidad de datos de rendimiento que se pueden procesar y luego convertir en información procesable ” (IBM, s.f.). Un ejemplo de un producto gemelo es el generador de una planta de producción de energía, que tiene múltiples piezas tomando el ejemplo anterior el generador cuenta con varios rodamientos gemelos entre otros.

- Gemelos de sistema o unidad

El siguiente nivel está un paso más arriba del gemelo de activo “involucra sistemas o unidades gemelas, que permiten ver cómo los diferentes activos se unen para formar un sistema en funcionamiento completo. Los gemelos del sistema brindan visibilidad con respecto a la interacción de los activos y pueden sugerir mejoras en el rendimiento” (IBM, s.f.).

Entonces, siguiendo con el ejemplo de la planta de producción de energía, y un sistema gemelo (según su definición) podría reflejar el estado histórico y actual y predecir el estado futuro de un tren de potencia particular de una planta de energía, toda la planta de energía o incluso una partición de una red eléctrica.

- Gemelos de proceso

“Los gemelos de proceso, el nivel macro de aumento, revelan cómo los sistemas trabajan juntos para crear una instalación de producción completa. ¿Están todos esos sistemas sincronizados para operar con la máxima eficiencia o los retrasos en un sistema afectarán a otros? Los gemelos de proceso pueden ayudar a determinar los esquemas de tiempo precisos que, en última instancia, influyen en la eficacia general” (IBM, s.f.). Los gemelos de procesos se utilizan para mostrar información relevante, entregar KPI, etc.

Como se comentó anteriormente, existen muchos tipos adicionales diferentes definidos por fabricantes de softwares empresas, etc. Los nombres varían, pero en esencia los tipos más importantes están cubiertos por las definiciones anteriores.

Los gemelos digitales toman el rol de la nueva versión de un centro de control que combina el estado histórico y actual del sistema con un estado futuro previsto. Las capacidades de desglose permiten a los usuarios sumergirse en productos individuales o partes de productos, pero también muestran el panorama general que permite tareas de optimización altamente complejas. Finalmente, los gemelos digitales no solo son útiles en la operación, sino que también despliegan todo su potencial cuando se tiene en cuenta el diseño y la fabricación y mantención del producto.

1.8. NIVELES DE GEMELOS DIGITALES

A diferencia de los tipos de gemelos digitales que nos explican a qué parte específica del equipo o proceso completo estamos representando, Cuando hablamos de niveles hacemos referencia al nivel de conexión y autonomía que queremos alcanzar con nuestro gemelo digital, esto va de la mano con la complejidad en su implementación, cantidad de datos a procesar y la brecha tecnológica de nuestras instalaciones.

En la industria actual, operadores y propietarios siempre se esfuerzan por crear un modelo operativo de gemelo digital más sólido para mejorar el margen operativo. Un modelo robusto se puede crear elevando el modelo de información ya existente a un modelo dinámico llamado gemelo digital. Si bien lo ideal sería conseguir un modelo del más alto nivel cada vez que incorporamos un activo o ponemos en marcha una planta nueva, se ha expuesto anteriormente que los gemelos digitales y sus metodologías son aplicables a lo largo de todas las fases del ciclo de vida ya sea de un activo o de la planta, por lo tanto, cuanto más temprana sea la adopción de esta solución tecnológica, más ricos serán los datos y los beneficios alcanzados, pero muchas veces esta solución se pasa por alto ya sea por el coste económico que significa esta implementación, o desconocimiento de estas tecnologías. Si se tuviera la información clara tanto en costes/beneficios

como en requisitos, esto podría ayudar a los operadores o dueños de las empresas a demostrar el valor a largo plazo de la inversión.

Por lo tanto, una visión más realista sería su implementación en etapas o niveles donde se vayan integrando funcionalidades a una arquitectura ya establecida.

1.8.1. PERSPECTIVA ANALÍTICA MADUREZ DEL GEMELO DIGITAL

A menudo se malinterpreta el concepto de madurez de un DT con el nivel de información/datos que entrega de él mismo y su entorno. Sin embargo, el nivel de madurez va directamente relacionado con el nivel de información procesada y transformada en indicadores útiles. Es un hecho que el gemelo digital tiene como fin conectar distintas entradas de datos de distintas fuentes, para tener esta información disponible de forma centralizada, con el fin de crear una “Versión única de la verdad” para un activo o proceso. Pero tener la información disponible es solo el primer paso, y se toma como base para avanzar en la madurez del gemelo. Con la información disponible se pueden realizar diferentes tipos de análisis como predictivo, prescriptivo, transformativo y cognitivo. Los conocimientos de datos de estos análisis se pueden vincular a casos de uso y resultados comerciales.

Existen muchos modelos que describen el nivel de madurez que ha alcanzado una organización con respecto a la generación y análisis de datos, estos modelos también son aplicables a las analíticas de aprendizaje automático. Un digital Twin combina ambas.

Sobre los modelos más aceptados está uno también creado por la empresa Gartner, que define la madurez de adopción de analítica o machine Learning según las siguientes dimensiones.

- ✓ El rango temporal considerado: pasado, presente o futuro.
- ✓ El nivel de intervención humana requerido para la toma de acciones y decisiones.
- ✓ La complejidad de los análisis matemáticos requeridos.

Para una mejor comprensión del proceso, podríamos decir que los gemelos digitales operan en 5 niveles diferentes según el grado de integración y sofisticación alcanzado. Esta división fue creada tomando en cuenta las dimensiones que propone Gartner para su metodología de madurez. Estos niveles van “desde un modelo más sencillo que integra datos de diversas fuentes a un modelo más avanzado que actúa de forma autónoma” (Editeca, s.f.).

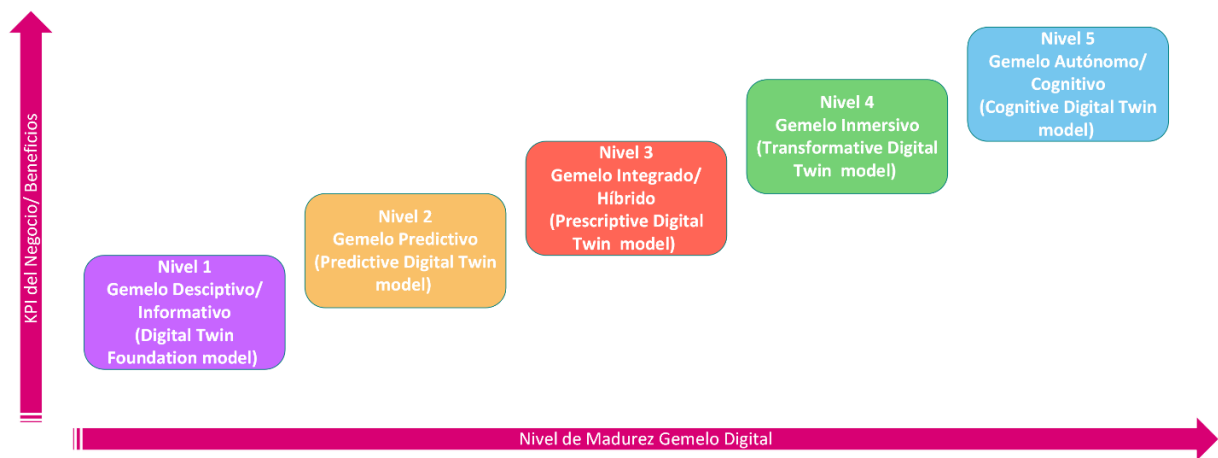


Gráfico 1-4 " Grafico Niveles de maduración DT "

(Fuente: elaboración propia en Visio a partir de Investigación)

“Es importante recalcar que los niveles 1 y 2 son los que actualmente se utilizan en arquitectura, ingeniería y construcción. Aún están por instaurarse los niveles 3, 4 y 5, que van enriquecidos con datos enviados en tiempo real desde sensores integrados y tecnologías IoT” (Editeca, s.f.). En estos niveles es donde áreas como la manufactura, fabricación y mantenimiento toman la ventaja.

1.8.2. DESCRIPCIÓN DE LOS NIVELES DE MADUREZ Y CAPACIDADES

- Nivel 1 Gemelo Descriptivo/Informativo (Digital Twin Foundation model) Es el nivel base, es un modelo que compila los datos de fases de diseño, fabricación y operación, si los hubiese, agregando la capa de datos procedentes de los sensores, los usuarios tienen la capacidad de especificar los datos que quieren que se incluyan, el gemelo se encarga de verificar los datos y la conexión entre sistemas.
- Nivel 2 Gemelo Predictivo (Predictive Digital Twin model) Este nivel conlleva a analizar datos de funcionamiento con el fin de obtener ciertas deducciones.
- Nivel 3 Gemelo Integrado/Híbrido (Prescriptive Digital Twin model) Este nivel agrega la capacidad de modelar datos y generar simulaciones, simular situaciones posibles de operación, obtener respuesta a la pregunta ¿qué pasaría si?.
- Nivel 4 Gemelo Inmersivo este nivel (Transformative Digital Twin model) está pensando en el uso de las capacidades del entorno virtual en conjunto con los datos reales

en la generación de un entorno virtual que se pueda utilizar para entrenamiento de tareas complejas usando Realidad Virtual.

- Nivel 5 Gemelo Autónomo/Cognitivo (Cognitive Digital Twin model) Este es el nivel más alto de un gemelo digital hasta la fecha, logra mediante el análisis de datos profundo y técnicas de ML la capacidad de aprender y completar acciones en nombre de los usuarios.

La siguiente tabla (Tabla 1-1) se muestra un resumen con las capacidades clave de cada nivel

Nivel de Maduración	Utilidad Aplicaciones
Gemelo Descriptivo/Informativo	Modelo Digital/Virtual
	Gestión de la información del activo
	Recopilación de datos en tiempo real
Gemelo Predictivo	Análisis de data en tiempo real
	Gestión de la performance del activo
	Mantenimiento predictivo
Gemelo Integrado/Híbrido	Diagnostico remoto
	Optimización
	Simulación de escenarios (What if? Simulation)
Gemelo Inmersivo	Entrenamiento inmersivo
	Colaboración Remota
	Operaciones aumentadas (AR/VR)
Gemelo Autónomo/Cognitivo	Convergencia virtual a física
	Mantenimiento PHM
	Operaciones Autónomas

Tabla 1-1 " Capacidades según nivel de maduración "

(Fuente: elaboración propia partir de Investigación)

CAPÍTULO 2: **INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS, ANÁLISIS DE**
NORMATIVAS Y SOFTWARES DISPONIBLES

2.1. INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS

Digital Twins está pensado como una plataforma integradora de toda la información y tecnologías que involucran el objeto de estudio, esto con el fin de procesarla y entregar datos útiles para retroalimentar el proceso o tomar decisiones claves.

Uno de los temas más complejos dentro de esta faceta integradora es como se hacen converger los datos de distintas fuentes, y como se realiza la inter-operatividad entre las tecnologías IOT y OT con el fin de que trabajen juntas Como lo hace SCADA en muchas empresas en la actualidad. Por otra parte, una de las fuentes más importantes de datos se puede conseguir mediante la simulación, su uso correcto, puede llegar a generar datos transcendentales para generar pronósticos tipo RUL y generar planes de mantenimiento PHM, muchas veces se confunde un gemelo digital con el concepto de simulación como tal en los siguientes puntos pasaremos a revisar en más detalle ambos puntos.

2.1.1 GEMELOS DIGITALES Y SCADA

SCADA al igual que digital Twins surgió en su momento producto de los desarrollos tecnológicos en redes de comunicación y microprocesadores, en cambio, digital Twins toma como base los avances y masificación de la tecnología IOT y los algoritmos de aprendizaje automático, se podría entender que digital Twins es la progresión lógica para la automatización industrial después de los sistemas SCADA en el Diagrama 2-1 se muestra de forma simplificada el proceso de funcionamiento de un sistema OT SCADA.



Diagrama 2-1 " Diagrama simplificado funcionamiento SCADA "

(Fuente: elaboración propia a partir de imagen de la web)

SCADA como su nombre lo indica, es una herramienta creada para la supervisión, control (control basado en reglas) y adquisición de data. Los datos adquiridos por un sistema SCADA se pueden utilizar para explicar una falla después de que esta ocurra. Sin embargo, SCADA no puede predecir la ocurrencia de fallas y evitar que sucedan o detectar anomalías por diseño.

Con el digital Twin y las técnicas de aprendizaje automático no supervisado, las anomalías se pueden identificar fácilmente y se pueden tomar precauciones. Dado que el gemelo digital rastrea los datos de todas las instalaciones de la misma máquina en todo el mundo, la experiencia de anomalías en un sitio se puede tener en cuenta en todas las máquinas del mismo modelo en todo el mundo.

Otra gran diferencia con el sistema SCADA es que su arquitectura funciona en un entorno cerrado, se puede observar esto en el Diagrama 2-2. La mayoría de los fabricantes de PLC trabaja con sus propios sensores y softwares de programación propios, etc.

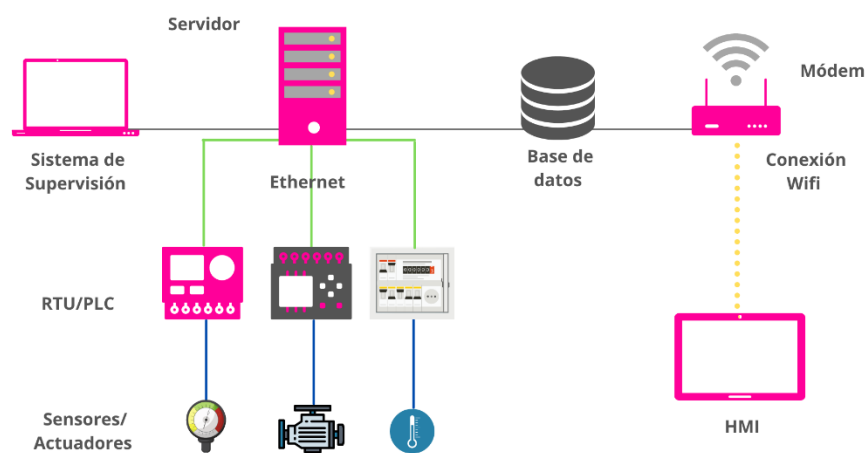


Diagrama 2-2 " Diagrama simplificado arquitectura SCADA "

(Fuente: Imagen de la web de NUNSYS)

Implementar gemelos digitales con plantas industriales existentes o muy antiguas es un desafío, un factor a tomar en cuenta es que la mayoría de las plantas dependen de múltiples OEM y proveedores para diversos requisitos. Los gemelos digitales aún no se han convertido en un estándar de la industria y, hasta que lo hagan, los beneficios del gemelo digital se limitarán a los OEM que buscan seriamente esta tecnología. Si bien SCADA sigue siendo suficiente para la mayoría de las operaciones industriales, las nuevas plantas industriales con una perspectiva a largo plazo son los mejores candidatos para implementar gemelos digitales.

Digital Twins en esencia se hace cargo de La integración de tecnología de legado como SCADA, aparte de la data existente, mucha arquitectura física también es aprovechable, conexiones y sensores que se pueden integrar al digital Twins parte de la confusión de ambas

tecnologías es que ambas usan interfaces HMI, SCADA seguirá contando con sus HMI locales y Digital Twins tiene la capacidad de replicar estos de forma remota para poder controlar los equipos.

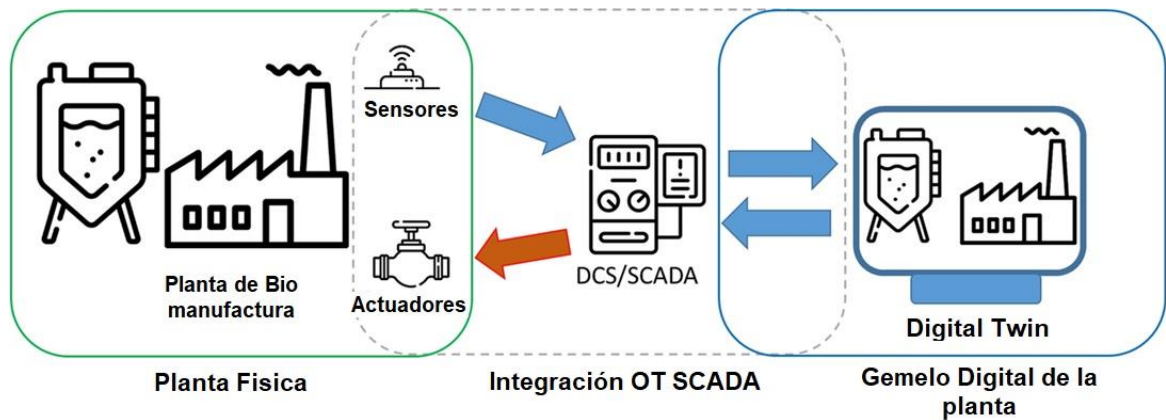


Diagrama 2-3 " Integración arquitectura SCADA "

(Fuente: elaboración propia a partir de imagen web)

En el diagrama 2-3 se muestra un ejemplo como se usa la arquitectura ya establecida de SCADA para su uso como intermediaria entre la planta física y la virtual en el contexto de aplicación de digital Twins en una planta de bio-manufactura.

Para poder tener el gemelo digital operativo, uno de los puntos clave es la infraestructura de TI necesaria para conectar la parte digital y física de la planta. Esto abarca todos los aspectos de automatización en la planta física y el vínculo de comunicación de la planta digital. La mayoría de las plantas actuales con cierto grado de automatización permiten que al menos alguna parte del proceso de producción se controle automáticamente a través de un sistema SCADA (Control de supervisión y adquisición de datos) o un DCS (Sistema de control distribuido). Además, muchas plantas también cuentan con un histórico de procesos al que se puede acceder a través de servidores internos. Aunque las nuevas generaciones de DCS son más que capaces de facilitar el funcionamiento de un Digital Twin.

Un gemelo digital puede conectarse a varios sistemas SCADA, adquirir sus datos, procesarlos, además de poder trabajar con HMI remotos para controlar cada uno de los procesos involucrados.

En resumen, si existe la arquitectura SCADA ya implementada en una planta, la data de este sistema se puede aprovechar, además es posible operar con la propia interfaz como puente para integrar la parte operativa de la planta al sistema de gemelo digital, con el fin de reducir los costes de adopción de esta tecnología. Esta integración no siempre es posible y se debe evaluar específicamente para cada caso, alguno de los puntos a tomar en cuenta es la antigüedad de los equipos (PLC y sensores), en ciertas ocasiones donde la inter-operatividad sea imposible se deberán

actualizar todos los equipos. Siempre es recomendable de ser posible actualizar los sensores de captación de datos.

	SCADA	IIoT
Inter-operatividad	Mayormente, usa protocolos propietarios (cada fabricante crea sus protocolos) para el control de sus componentes	Inter-operatividad usando los protocolos de internet
Sensores y Actuadores	Conexiones por cable y típicamente conectados directamente a los controladores de campo	Conexiones Alámbricas e inalámbricas, y pueden o no estar conectados a los controladores de campo
Recolección de datos	Usualmente, la colección de datos se hace directamente en las controladoras dentro de las instalaciones	Pueden coleccionar data en la nube o directamente a las controladoras
Integración	Bloqueos del fabricante lo que afecta la comunicación e integración entre dispositivos de diferentes fabricantes o softwares	Se adhieren a estándares abiertos de integración de diferentes dispositivos y softwares.

Tabla 2-1 " Ventajas de IIoT v/s SCADA "

(Fuente: elaboración propia a partir de investigación)

La tabla 2-1 a muestra las ventajas de los sensores IIot sobre los sensores que usa SCADA actualmente.

2.1.2 GEMELOS DIGITALES Y SIMULACIONES

Existe mucha confusión en los términos de gemelos digitales y las simulaciones, se tiende a pensar que son lo mismo porque ambas usan modelos digitales para emular los diversos procesos de un sistema, pero la gran diferencia es que el gemelo digital es más complejo y se considera más un entorno virtual que una simulación.

Esto lo transforma en un ambiente, lo que lo vuelve significativamente más rico para el estudio. “Esta diferencia entre el gemelo digital y la simulación es en gran medida una cuestión de escala: Las simulaciones se utilizan normalmente para el diseño y, en ciertos casos, para la optimización sin conexión. Los diseñadores introducen cambios en las simulaciones para observar situaciones hipotéticas. Los gemelos digitales, en cambio, son entornos virtuales complejos con los que se puede interactuar. Estos entornos se actualizan en tiempo real. Son más grandes en términos de escala y aplicación. Mientras que una simulación normalmente estudia un proceso en particular, un gemelo digital puede ejecutar por sí mismo cualquier cantidad de simulaciones útiles para

estudiar múltiples procesos” (IBM, s.f.), o en palabras más simples puede estudiar varios procesos a la vez, con las interacciones que estas producen entre sí y en el entorno.

“Existen muchas más diferencias, pero una de las relevantes es que las simulaciones en la mayoría de los casos no se benefician de tener datos en tiempo real. En cambio, los gemelos digitales están diseñados en torno a un flujo de información bidireccional que se produce primero cuando los sensores de objetos proporcionan datos relevantes al procesador del sistema y luego vuelve a suceder cuando los conocimientos creados por el procesador se comparten con el objeto de origen original.

Esta retroalimentación de datos bidireccional genera datos mejores y constantemente actualizados relacionados con una amplia gama de áreas, combinados con la potencia informática adicional que acompaña a un entorno virtual, los gemelos digitales pueden estudiar más problemas desde muchos más puntos de vista que las simulaciones estándar, con un mayor potencial final para mejorar productos y procesos” (IBM, s.f.).

Algunas compañías de software como ANSYS consideran al gemelo digital como parte de la evolución de las representaciones virtuales Ilustración 2-1, tomando en cuenta que ellos cuentan con una solución de software de implementación de gemelos digitales, que extrae datos basados en simulación.

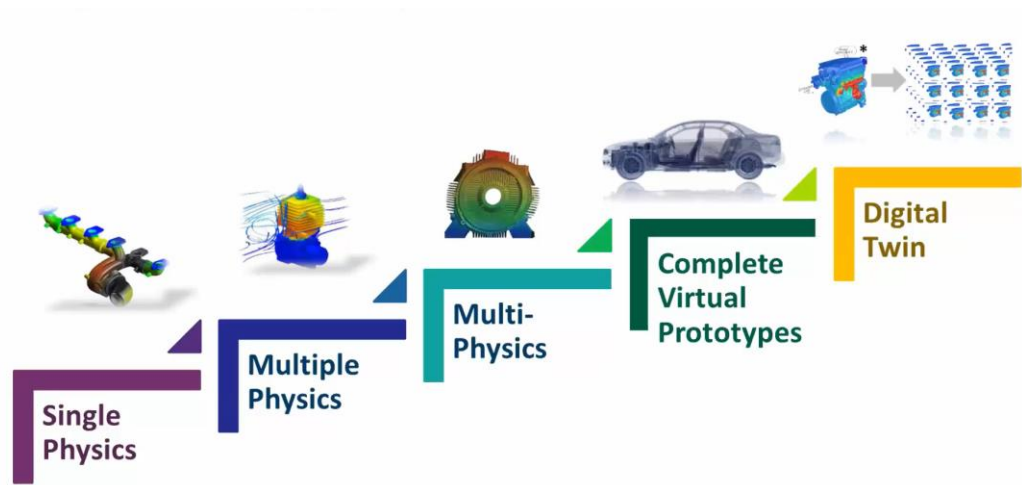


Ilustración 2-1 " Evolución de representaciones virtuales "

(Fuente: Seminario online Ansys Twin Builder)

En la actualidad la mayoría de los gemelos digitales integra simulación de tipo matemático que a base de datos que representan el comportamiento del equipo y las interacciones de sus componentes, puede generar pronósticos de comportamiento, estas simulaciones matemáticas son perfectas para los algoritmos de machine Learning, pero para un ingeniero que quiera generar una simulación, solo con datos se complejiza el tema no solo por el volumen de

información sino por el número de interacciones de los equipos, esto se soluciona con mundo de la simulación CAE que provee información de simulaciones interactivas y dinámicas basadas en modelos CAD que muchos fabricantes ya posee, ya que son la base de los diseños y la fabricación de las maquinarias, no todos los gemelos digitales soporta estos modelos cae directamente, muchos otros soportan lenguajes de programación como modélica que en términos simples es un lenguaje de programación orientado a objetos desarrollado para describir de manera sencilla modelos de sistemas dinámicos que podrían llegar a ser muy complejos, aun así este lenguaje no alcanza el verdadero potencial de las simulaciones CAE y su universo de simulaciones específicas y complejas como pueden ser DEM, FEM y CFD, en un esfuerzo de aprovechar estas simulaciones de softwares específicos y muy potentes se creó un estándar para poder exportar estas simulaciones y aprovechar estos datos para potenciar los gemelos digitales

Formato FMI y FMU

“La interfaz funcional Mock-Up (FMI) es un estándar abierto para importar y exportar modelos de simulación. FMI también es independiente de la herramienta, lo que simplifica la creación, el almacenamiento y el intercambio de simulaciones entre colaboradores que pueden usar diferentes sistemas de modelado o marcos, al admitir la reutilización y la reutilización de simulaciones, el estándar FMI también aumenta el valor del desarrollo de simulaciones y la inversión en cartera de simulación.

Una unidad de Mock-Up funcional es un archivo con la *.fmu extensión que describe un modelo de simulación siguiendo el estándar FMI. El estándar FMI admite dos tipos de FMU:

- Intercambio de modelos (ME) Las FMUs describen una simulación mediante ecuaciones matemáticas. Para simular correctamente un sistema real, la herramienta de importación de FMU debe conectar la FMU a un solucionador numérico. El solucionador numérico establece el estado de FMU, solicita los derivados del estado, determina un tamaño de paso adecuado y decide cómo calcular el estado en el siguiente paso.
- Co-Simulation (CS) Las FMUs incluyen un solucionador numérico integrado. Para simular correctamente un sistema real, la herramienta de importación de FMU establece las entradas de FMU, pide al FMU que avance en un momento dado y lea la salida de FMU” (microsoft, 2022).



Ilustración 2-2 " Formatos de intercambio FMI-FMU "

(Fuente: Artículo técnico Co-Simulation and others models through FMI ,Samares Engineering)

2.1.3 ARQUITECTURA DE LOS GEMELOS DIGITALES

Los campos de aplicación de los gemelos digitales están abarcando la mayoría de las industrias, pero principalmente industrias como fabricación (en general), la industria automotriz y la construcción, últimamente se ve un gran avance ligado a la estandarización en el uso de la metodología BIM en construcción, lo que produjo una rápida expansión de la tecnología de gemelos digitales en áreas como servicios públicos y servicios sanitarios, redes de alcantarillado saneamiento de aguas, etc. Todo esto ligado al concepto de ciudades digitales.

Los gemelos digitales no solo se usan durante la operación de un sistema, sino que ahora se está enfocando su uso e implementación durante las fases de diseño y construcción, para que datos de estas etapas tempranas se almacenen y usen pensando en la operación. Y acompañen al sistema o equipo durante todo su ciclo de vida, incluso pensando en su fin y posterior reciclaje.

Para explicar su funcionamiento primero se debe entender la tecnología actual que conforma la arquitectura de gestión de datos, las bases de datos y el aprendizaje automático.

Los gemelos digitales tienen como propósito conectar el mundo físico con el virtual, pero esto se puede interpretar de muchas maneras, una simulación o por ejemplo un software ERP que cambia la gestión de activos físicos por copias virtuales, cada registro en la base de datos de un activo, un componente, una base de datos que describa el comportamiento de un cliente se puede considerar como una copia digital, pero para considerarse un gemelo digital se debe tomar en cuenta tres aspectos muy importantes.

- Internet de las cosas (IoT) e Internet Industrial de las cosas IIoT.
- Integración de datos en tiempo real.
- Aprendizaje automático en tiempo real.

2.1.4 INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS IOT, IIOT Y MACHINE LEARNING

(i) **Internet de las cosas e IIoT:**

“Internet de las cosas se refiere a una red colectiva de dispositivos conectados y a la tecnología que facilita la comunicación entre los dispositivos y la nube, así como entre los propios dispositivos. Ante la llegada de chips de computadora baratos y a las telecomunicaciones de gran ancho de banda, ahora existen miles de millones de dispositivos conectados a Internet. Los gemelos digitales se basan en los datos de los sensores de IoT para transmitir información del objeto del mundo real al objeto del mundo digital. Los datos se introducen en una plataforma de software o en un panel donde es posible ver cómo se actualizan los datos en tiempo real” (AWS, s.f.).

“La diferencia entre el Internet de las Cosas (IoT) y su versión industrial (IIoT) es que mientras el IoT está enfocado a servicios para los consumidores, el IIoT se concentra en aumentar la seguridad y la eficiencia en los centros de producción” (Iberdrola, s.f.).

“El Internet Industrial de las Cosas (IIoT) es el conjunto de sensores, instrumentos y dispositivos autónomos conectados a través de Internet a aplicaciones industriales. Esta red permite recopilar datos, realizar análisis y optimizar la producción, aumentando la eficiencia y reduciendo los costes del proceso de fabricación y prestación de servicios. Las aplicaciones industriales son ecosistemas tecnológicos completos que conectan dispositivos y a estos con las personas que gestionan los procesos en líneas de montaje, logística o distribución a gran escala” (Iberdrola, s.f.).

(ii) **Integración de datos en tiempo real:**

Se ha realizado integración de datos por lotes por décadas, pero para hablar de integración de datos en tiempo real se necesitan latencia de transmisión extremadamente bajas.

Para poder comprender la integración de datos en tiempo real en IOT es necesario hablar de computación perimetral (Edge computing) Diagrama 2-4 la explosión de la computación en la nube surgió tan rápido que nadie tomo en cuenta los costes de mantener grandes servidores, otro problema es que los datos en la nube no siempre son pre procesados lo cual hace que en mayor parte sean datos en cantidad, pero con poca o nula calidad para su real aprovechamiento, por estas razones no siempre se deben integrar los datos de almacenamiento en una nube centralizada También se puede distribuir sobre bordes (servidores internos o nodos (FOG Computing)), y la información se puede procesar o pre procesar. directamente, donde tenga más sentido.

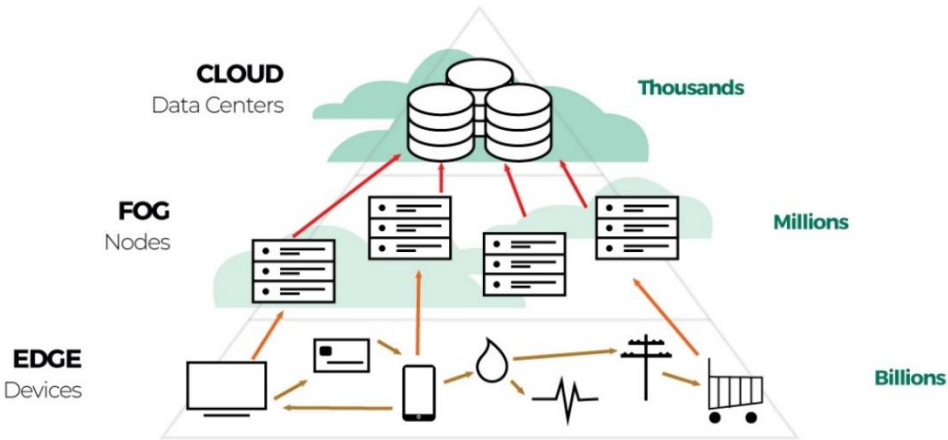


Diagrama 2-4 " Arquitectura de red "

(Fuente: Artículo Web Escuela de negocios, innovación y tecnología Zigurat)

Edge Computing aborda tres preocupaciones principales:

Particionamiento de red. Cuanto más cerca alejado esté el nodo de la red principal o más cerca del borde de nuestra red, menos confiables pueden volverse sus conexiones de red. Por lo

tanto, una forma más inteligente de procesamiento local de datos mitiga el problema de los bordes desconectados, instalando más nodos o asegurando la calidad de conexión de red.

Por ejemplo, un sistema de domótica que controla su lavadora, usted le da una orden de comenzar el ciclo de lavado, para que al llegar al hogar este lista para ser colgada, pero su conexión fallo y esta orden no es entregada al dispositivo hasta que la conexión sea restablecida lo cual retrasa todo el proceso.

Latencia de conexión. Nuevamente, cuanto más se acerca al borde, la latencia de la red en su conexión crece más y más. Las decisiones sobre los datos que se toman en el borde evitan esta latencia, por lo que las decisiones se toman más rápido. La latencia de la red es una característica importante, ya que la mayoría de los datos de los sensores de IoT pierden su valor en los primeros segundos.

Por ejemplo, en un automóvil autónomo, después de que un niño corre frente al automóvil, no desea esperar otros 250 ms para que los frenos detengan el automóvil.

Privacidad de datos. Los sensores de IoT o IIoT, incluidas cámaras y micrófonos, están capturando datos muy valiosos. Pero también plantean las mayores preocupaciones sobre la privacidad de los datos. Si los datos se procesan directamente en el perímetro, la información crítica nunca tendrá que salir del diminuto dispositivo perimetral. Por ejemplo, la ocupación en un ascensor se mide mediante el procesamiento de video, puede optimizar la programación y la asignación de pisos para reducir el tiempo de espera y mejorar la carga de trabajo de los ascensores. Sin embargo, nunca desea que la transmisión de video desde el interior de un ascensor salga del dispositivo de borde.

(iii) **Aprendizaje automático en tiempo real:**

“La inteligencia artificial (IA) es el campo de la informática que se dedica a resolver problemas cognitivos comúnmente asociados a la inteligencia humana, como el aprendizaje, la resolución de problemas y el reconocimiento de patrones. El machine Learning (ML) es una técnica de IA que desarrolla modelos estadísticos y algoritmos para que los sistemas informáticos realicen tareas sin instrucciones explícitas, basándose en patrones y en la inferencia. La tecnología de gemelos digitales utiliza algoritmos de machine Learning para procesar grandes cantidades de datos de sensores e identificar patrones de datos. La inteligencia artificial y el machine Learning (AI/ML) proporcionan información sobre la optimización del rendimiento, el mantenimiento, la producción de emisiones y la eficiencia” (AWS, s.f.).

Actualmente, los sistemas de ERP tradicionales son sistemas basados en reglas, Estas reglas establecen parámetros como permisos, manejo de datos, niveles de autoridad, etc. Las reglas se implementan de forma manual en el software, la mayor parte de estas se derivan del manejo de

expertos y dentro los procesos, en la recopilación de datos existe mucho trabajo manual de preprocesamiento o limpieza de datos involucrado, la mayor parte de las veces estas reglas se establecen en el inicio del uso del software y se cambian con muy baja frecuencia.

En los gemelos digitales, los datos se captan, analizan y procesan en tiempo real. Esto permite que los modelos de sistemas físicos, como los modelos de caja negra impulsados por el aprendizaje automático o los modelos de caja blanca definidos por expertos, actúen sobre los datos en tiempo real.

Por ejemplo Un sensor descentralizado de una maquinaria detecta una anomalía, se genera una alerta y en consecuencia se paraliza la línea de producción dado que se interpretó que esta anomalía podría causar daños mayores, cuando se realiza la investigación la anomalía se debió a una falla leve que no ameritaba la parada de línea y como consecuencia perdida productiva, por otro lado, esto se puede evitar simulando distintos escenarios con diferentes conjuntos de parámetros en el gemelo digital los sensores trabajan en forma conjunta entregando información que se evalúa automáticamente con el sistema real se actualiza y calibra, de tal forma de evitar paradas innecesarias.

La mayoría de los sistemas de los modelos de aprendizaje automático son entrenados con datos históricos (datos en reposo) tomados de base de datos, muchas veces ingresados manualmente, lo que genera un cierto grado de error por el factor humano que intervine.

Para poder lograr aprendizaje automático en tiempo real, los datos en tiempo real deben almacenarse y recuperarse de manera eficiente.

Una fase crítica en la implementación del aprendizaje automático es la fase de ajuste de hiperparámetros en la que vuelve a ejecutar el entrenamiento de su modelo, muchas veces con configuraciones de parámetros modificadas solo para obtener el mejor resultado. Este proceso de ajuste de configuraciones de hiperparámetros es mucho más difícil en flujos de datos porque si tiene una idea nueva o quiere probar un algoritmo nuevo, los datos ya no están porque no están almacenados.

En el entrenamiento de modelos en tiempo real, el rendimiento de su sistema siempre debe mantenerse al día con la tasa de llegada de datos, esto quiere decir que el sistema debe tener la capacidad para leer e interpretar toda la cantidad de datos que llega. De lo contrario, los búferes se desbordan y el sistema comienza a perder información (desechar datos).

Realizar el aprendizaje automático en tiempo real es complejo por los puntos expuesto anteriormente, en especial el punto del entrenamiento y ajuste de hiperparámetros, supongamos que tenemos una máquina implementamos los sensores infraestructura y software para realizar un gemelo digital como puede predecir de la manera más certera si solo tiene información disponible almacenada captada desde el tiempo de su puesta en marcha, y el entrenamiento está limitado a la

experiencia del programador con ayuda del mantenedor u operario, pero muchas veces estas interacciones entre personal no se dan y el entrenamiento es deficiente, esto da como resultado predicciones que muchas veces no son tan certeras como deseamos.

Esto se soluciona integrando al sistema data histórica y haciéndola trabajar en conjunto, pero en ocasiones no existe suficiente data histórica, ya sea porque el equipo es muy nuevo o en equipos muy antiguos no se digitalizaba la data en estos casos Se trabaja sobre un gemelo digital basado en simulación donde la data faltante se cubre con simulaciones de condiciones hipotéticas.

Otra manera de resolverlo es usando aprendizaje profundo (Deep Learning) o también conocida como Redes neuronales, este tipo de aprendizaje automático tiene un nivel mayor de madurez y consiste en que la IA imite la forma de aprendizaje de los humanos, en conjunto con simulaciones de distintos escenarios

El modelo más holístico de gemelo digital es el híbrido que integra tanto sensórica para captación de datos en tiempo real, Data histórica y simulación. Y con base en este conjunto de datos, aplicar machine Learning o Deep Learning con el fin de brindarle la mayor autonomía posible al gemelo en la toma de decisiones.

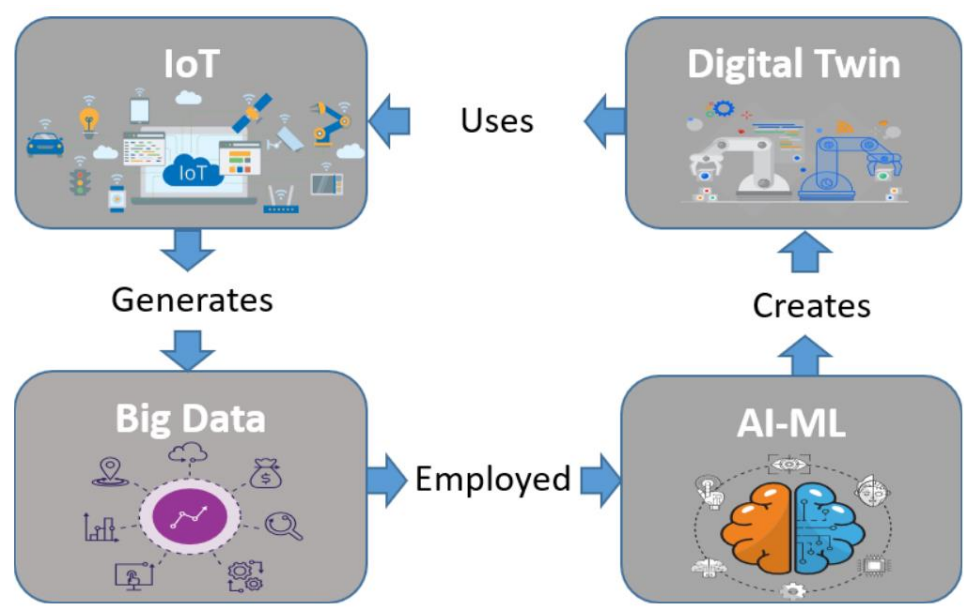


Diagrama 2-5 " Flujo de información integrado en un Gemelo Digital "

(Fuente: Artículo The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning, Febrero 2021)

2.2. ANÁLISIS DE NORMATIVAS Y ESTÁNDARES QUE INVOLUCRAN DIGITAL TWIN

Desde que esta tecnología se empezó a tomar en serio, destacando por sus posibilidades de optimización de procesos, se han creado múltiples Normativas que buscan estandarizar información y unificar términos para simplificar la adopción de esta tecnología, Algunos de los estándares que busca regular a los digital Twins son los siguientes.

2.2.1 NORMA IEC TS N°62832

IEC TS (The International Electrotechnical Commission Technical Specifications).

La norma IEC 62832 del año 2020 Titulada “Medición, control y automatización de procesos industriales en el marco de la Fábrica digital (DF)”

La Comisión Electrotécnica Internacional de especificaciones técnicas mediante su estándar buscar definir un marco para sus Fábricas digitales (marco DF), que es un conjunto de elementos del modelo (modelo de referencia del DF (Modelo Físico)) y reglas para modelar sistemas de producción.

Este marco DF define:

- Un modelo de activos del sistema de producción.
- Un modelo de relaciones entre los diferentes activos del sistema de producción.
- El flujo de información sobre los activos del sistema de producción.

El marco de DF no cubre la representación de la construcción de edificios, los recursos de entrada (como la materia prima de producción, las piezas de ensamblaje), los consumibles, las piezas de trabajo en proceso ni los productos finales.

Se aplica a los tres tipos de procesos productivos (control continuo, control por lotes y control discreto) en cualquier sector industrial (por ejemplo, industrias aeronáutica, automoción, química, madera).

No hace referencia al término gemelos digitales en sí, pero lo que ellos llaman y describen en la norma como Digital Factory en esencia es un Gemelo Digital de una fábrica.

2.2.2 NORMA IEEE N°P2806

IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)

Estándar IEEE P2806 Titulado Sistema de arquitectura para la representación de objetos físicos en entornos de fabricación, con fecha de aprobación 21/03/2019 este Estándar establece los requisitos de conectividad de la representación digital de objetos físicos en entornos de fábrica Basados en datos heterogéneos, los requisitos de conectividad incluyen conversión de protocolo de alta velocidad, modelado de datos unificado e interfaces de acceso a datos para cumplir con los requisitos de interoperabilidad e interacción entre objetos físicos y las representaciones digitales correspondientes.

2.2.3 NORMA IPC N°2551

IPC (The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits)

Estándar Internacional IPC 2551 es parte de los estándares IPC enfocados en las innovaciones y busca prepararnos para “La fábrica del futuro” Este estándar Define el “IPC Digital Twin”, que se compone de los marcos Digital Twin Product, Digital Twin Manufacturing y Digital Twin Lifecycle. Dentro de la Arquitectura Gemelo Digital, el estándar IPC-2551 estipula y define las propiedades, tipos, complejidades y niveles de preparación del Gemelo Digital. El IPC Digital Twin incluye información histórica sobre un producto, incluida la historia del diseño en términos de revisión y cambios de ingeniería, e información de fabricación, que muchos denominan Digital Thread.

Esta es el primer estándar publicado de carácter internacional que se refiere a los gemelos digitales como tal, entre su contenido divide varias definiciones de gemelos digitales que abarcan todo el ciclo de vida, estas definiciones están separadas en 3 grandes grupos

- ✓ Gemelos digitales de producto.
- ✓ Gemelos digitales de manufactura.
- ✓ Gemelos digitales de ciclo de vida.

Este Estándar es el más relevante hasta el momento publicado porque también entrega un mecanismo integral, de evaluación para que cualquier empresa autodiagnostique su nivel actual de preparación para adoptar la tecnología de gemelos digitales, y así pueda planificar su transición a esta nueva tecnología.

Este estándar brinda un real valor para las empresas que se encuentran en etapa de desarrollo y buscan aplicar un marco tecnológico para la adopción de gemelos digitales en sus operaciones.

Otro punto para destacar es que el estándar establece una arquitectura de interoperabilidad de todas las formas de procesamiento de datos digitales, que representaran con precisión las capacidades físicas del objeto a través de datos captados por los sensores.

Esto se logra a través de un desarrollo detallado de la arquitectura, Esto permite a cualquier fabricante crear y utilizar el estándar de gemelo digital IPC para representar sus procesos y reflejar el comportamiento de las posibles acciones tomadas en un producto dentro del entorno de fabricación y ciclo de vida, para ingeniería, modelado, planificación, análisis de calidad y confiabilidad, simulaciones y mucho más, lo que permite decisiones críticas para optimizar el diseño de productos, procesos y materiales.

“Los beneficios de establecer un marco de gemelo digital y las herramientas que funcionan dentro del marco garantizarán que se cumplan las expectativas físicas sin la necesidad de un prototipo físico”, afirmó Matt Kelly, tecnólogo jefe de IPC. "IPC-2551 ayudará con la optimización de los procesos, reduciendo las pérdidas asociadas con la fabricación y la logística, aumentando la productividad, la eficiencia y el rendimiento de los costos", agregó Kelly.

2.2.4 NORMA ISO 23247:2021

Norma ISO 23247:2021 define un marco para respaldar la creación de gemelos digitales de elementos de fabricación observables que incluyen personal, equipos, materiales, procesos de fabricación, instalaciones, medio ambiente, productos y documentos de respaldo.

Un gemelo digital ayuda a detectar anomalías en los procesos de fabricación para lograr objetivos funcionales como control en tiempo real, mantenimiento predictivo, adaptación en proceso, análisis de Big Data y aprendizaje automático. Un gemelo digital monitorea su elemento de fabricación observable mediante la actualización constante de datos operativos y ambientales relevantes. La visibilidad del proceso y la ejecución que permite un gemelo digital mejora la operación de fabricación y la cooperación empresarial.

El tipo de fabricación respaldada por una implementación del marco ISO 23247 depende de los estándares y tecnologías disponibles para modelar los elementos de fabricación observables. Diferentes dominios de fabricación pueden usar diferentes estándares de datos. Como marco, este documento no prescribe formatos de datos y protocolos de comunicación específicos.

Los alcances de las cuatro partes de esta serie se definen a continuación:

— ISO 23247-1: Principios y requisitos generales para desarrollar gemelos digitales en la fabricación.

— ISO 23247-2: Arquitectura de referencia con vistas funcionales.

— ISO 23247-3: Lista de atributos de información básicos para los elementos de fabricación observables.

— ISO 23247-4: Requisitos técnicos para el intercambio de información entre entidades dentro de la arquitectura de referencia.

En resumen, para una implementación universal de gemelos digitales, y en especial en el sector industrial, se necesita unificar Normativas

- Es necesario Tener definiciones de conceptos únicas y precisas
- Terminologías y protocolos de comunicación e inter-operatividad comunes
- Marco de implementación y lineamientos

Si bien esta Normativa ISO dedicada a Digital Twins (ISO 23247:221) es muy reciente (se publicó en octubre de 2021), no todas las compañías están al tanto de su existencia y aunque recopila la mayoría de información necesaria para un marco de implementación y trabajo adecuado en el desarrollo de sus 4 tomos, es una normativa muy básica y tiene mucha similitud con la normativa IEC, por otra parte, una de las normas más completas es la IPC 2551, aunque en su desarrollo toma muchas referencias de BIM y el sector AEC e introduce conceptos propios lo cual solo contribuye a causar más confusión.

Si bien estas normativas son un gran avance y se sigue trabajando en favor de generar directrices más claras, como por ejemplo con la ISO/IEC 30173 ED1 (en fase de desarrollo) Que entrega la visión de gemelos digitales para un uso universal que puede entregar soluciones para distintas áreas como de construcción, de ingeniería y manufactura, etc. si bien entrega una definición universal de gemelo digital diferencia aplicaciones según los siguientes puntos

- Como gemelos digitales para manufactura
- Gemelos digitales para estructuras y sus sistemas
- Servicios de Salud
- Planificación Urbana

Otras normas para tener en consideración, si bien no son propiamente de gemelos digitales, hacen alusión a parte fundamental de los requisitos de instauración de un sistema de DT, Por ejemplo

“La norma ISO 17359 dicta los pasos que se deben tomar en cuenta al instaurar un programa de monitoreo de condición de máquinas. Otras normas se aplican en condiciones ideales, o únicamente se aplica en casos de puesta en marcha de equipos, pero la ISO 17359 es un estándar aplicable a todas las máquinas” (Evtech, 2019).

Otras normas que pueden intervenir puede ser la ISO 14224:2016 que establece la Recolección e intercambio de data de confiabilidad y mantenimiento para equipos, si bien es un

estándar para la industria Petroquímica y gas en forma y fondo es aplicable a todas las demás industrias.

2.3. DIGITAL TWIN CONSORTIUM

La historia y aplicaciones de digital Twins sigue creciendo día a día y ningunas de las normas anteriormente mencionadas se hace cargo de esto, nuevas aplicaciones y flexibilidad de aplicación. Es por esto por lo que Actualmente existen iniciativas como “Digital Twin Consortium esta asociación sin ánimo de lucro Objects Management Group (OMG) fundada por Ansys, Dell Technologies, Lendlease y Microsoft (algunos de los actores y dueños de plataformas claves para creación de DT) este organismo está plenamente dedicado a impulsar y normalizar de forma universal el gemelo digital en la industria y la gestión de instalaciones” (InfoPLC, 2020).



Ilustración 2-3 " Logo Corporativo OMG Digital Twin Consortium "

(Fuente: Pagina Web de la OMG DT Consortium)

“Entre los objetivos del Digital Twin Consortium están:

- Acelerar el mercado de tecnologías de gemelos digitales, estableciendo hojas de ruta y pautas de la industria a través de un ecosistema de expertos en gemelos digitales.
- Mejorar la interoperabilidad de las tecnologías digital twin desarrollando mejores prácticas de seguridad, privacidad y confiabilidad e influyendo en los requisitos para los estándares gemelos digitales.
- Reducir el riesgo de proyectos y demostrar el valor de las tecnologías digital twin a través de casos de uso de pares y el desarrollo de código fuente abierto ” (InfoPLC, 2020).

“Esta nueva organización, a la cual se puede acceder de manera abierta, impulsará la coherencia en el vocabulario, la arquitectura, la seguridad y la interoperabilidad para ayudar a

avanzar en el uso de la tecnología gemela digital en muchas industrias, desde la aeroespacial hasta los recursos naturales.

"La mayoría de las definiciones de gemelo digital son complicadas, pero no es una idea complicada. Los gemelos digitales se usan para motores a reacción, un Mars Rover, un chip semiconductor, un edificio y más. Lo que hace que un gemelo digital sea difícil es la falta de comprensión y estandarización", comenta Richard Soley, director Ejecutivo del Consorcio. "Al igual que lo que hemos hecho para la transformación digital con el Industrial Internet Consortium y el Consortium for Information and Software Quality, planeamos construir un ecosistema de usuarios, impulsar las mejores prácticas para el uso de gemelos digitales y definir requisitos para nuevos estándares gemelos digitales" (InfoPLC, 2020).

"Un ecosistema de empresas, incluidas las de los sectores de administración de instalaciones, construcción, aeroespacial y defensa, manufactura y recursos naturales, compartirá las lecciones aprendidas de sus diversas industrias y trabajará en conjunto para resolver los desafíos inherentes al despliegue de gemelos digitales. A medida que se definen los requisitos para los nuevos estándares, Digital Twin Consortium los compartirá con organizaciones de desarrollo de estándares, como la OMG.

Los miembros de Digital Twin Consortium se comprometen a utilizar digital twin en todas sus operaciones y cadenas de suministro y capturar las mejores prácticas y los requisitos de estándares para ellos y sus clientes. Las tarifas de membresía se basan en los ingresos anuales.

Los miembros fundadores, Ansys, Dell Technologies, Lendlease y Microsoft, tendrán cada uno asientos permanentes en un Comité Directivo elegido, proporcionando la hoja de ruta estratégica y creando grupos de trabajo para miembros.

Sam George, vicepresidente corporativo, Azure IoT, Microsoft Corp. comentó: "Microsoft está uniendo fuerzas con otros líderes de la industria para acelerar el uso de gemelos digitales en los mercados verticales. Estamos comprometidos a construir una comunidad abierta para promover las mejores prácticas y la interoperabilidad, con el objetivo de ayudar a establecer un sistema probado y listo para usar patrones de diseño y modelos estándar para negocios específicos y conceptos básicos que abarcan dominios".

"La aplicación de la tecnología Digital Twin a la cartera de trabajo de Lendlease está en marcha y ya nos estamos dando cuenta de los beneficios de esta innovación para nuestro negocio en general", dijo Richard Ferris, CTO, Digital Twin R&D, Lendlease. "El momento es ahora, y requiere que todo el ecosistema colabore en conjunto, se aleje del legado que ha obstaculizado la

innovación de esta industria y adopte la tecnología digital twin para la futura prosperidad económica y sostenible del mundo. El consorcio es la clave para la aceleración global de esta colaboración y las recompensas sociales que sabemos que son posibles con esta tecnología y enfoque".

"Dell Technologies se enorgullece de ser uno de los miembros fundadores del Consorcio Digital Twin. A medida que la tasa de transformación digital continúa acelerándose, los métodos estándar de la industria para Digital Twins permiten el desarrollo de productos a gran escala y altamente eficiente y la gestión del ciclo de vida al tiempo que desbloquean oportunidades para la creación de nuevo valor. Estamos encantados de ser parte de esta iniciativa mientras trabajamos junto con nuestros pares de la industria para optimizar las tecnologías que darán forma a la próxima década de datos para nuestros clientes y el ecosistema más amplio", dijo Vish Nandlall, vicepresidente, Estrategia tecnológica y ecosistemas, Dell Technologies.

"El Consorcio está cultivando un ecosistema de socios muy diverso para acelerar la implementación de gemelos digitales, lo que permitirá a las empresas reducir drásticamente los gastos, acelerar el desarrollo de productos y generar nuevos modelos de negocio dinámicos", dijo Prith Banerjee, directora de tecnología de Ansys. "Ansys se siente honrado de unirse al estimado comité directivo del Consorcio y espera colaborar estrechamente con otros miembros para promover el éxito del Consorcio y ayudar a definir el futuro de los gemelos digitales"" (InfoPLC, 2020).

2.4. SOFTWARES Y PLATAFORMAS DISPONIBLES EN EL MERCADO

Actualmente, existen 2 formas de generar un gemelo digital, la primera es a través de la instalación de un softwares (programas locales instalados en un PC local o servidor) la segunda a través de una plataforma web, también conocida como plataformas digitales o plataformas virtuales, son espacios en Internet que permiten la ejecución de diversas aplicaciones o programas en un mismo lugar (en este caso en la Web con datos alojados en la nube) para satisfacer distintas necesidades. Ambas pueden o no trabajar en conjunto, también pueden incluir aplicaciones móviles, etc.

Entre los softwares y plataformas más destacables desde el punto de vista de aplicaciones de mantenimiento se encuentran los siguientes:

2.4.1 ANSYS TWIN BUILDER Y TWIN DEPLOYER

Es una solución Completa para Crear, Validar e implementar un gemelo digital orientado principalmente a gemelos digitales basados en simulación para análisis híbrido.

Ansys Twin Builder es una solución abierta que permite a los ingenieros crear gemelos digitales basados en simulación: representaciones digitales de activos con entradas de sensores virtuales o del mundo real. Estos se pueden implementar para administrar todo el ciclo de vida de productos y activos.

El paradigma de simulación de gemelos digitales permite aumentar la eficiencia con el tiempo, programando el mantenimiento en torno a metodologías predictivas que se vuelven más precisas con las pruebas y respuestas del mundo real. Al implementar Ansys Twin Builder, es posible mejorar los ingresos brutos, gestionar los costes finales y obtener y conservar una ventaja competitiva.

Esta solución de software combinada con plataformas de visualización web se divide en 2 partes principales (Diagrama 2-6)

Twin Builder: encargada de la parte principal del gemelo digital, la base donde integra módulos de información, conexión de dispositivos, sensores y arquitectura de visualización 3d

Twin Deployer: se encarga del manejo de las bases de datos y la integración e IA y análisis híbridos (integración de simulación a la data existente)

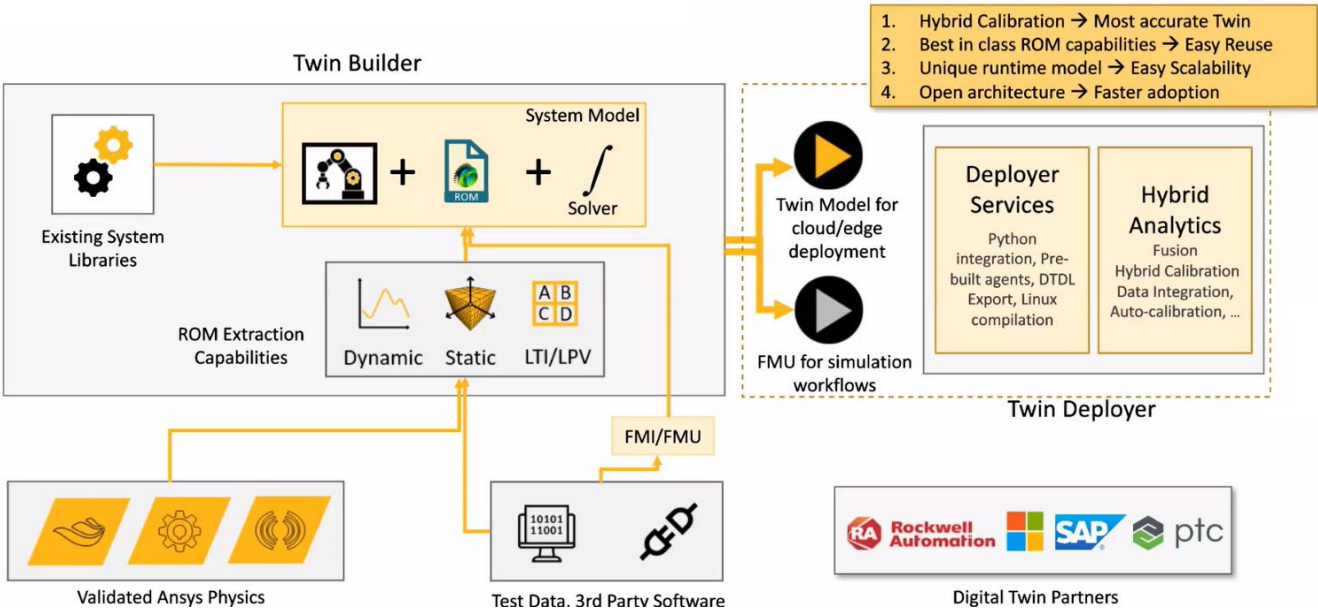


Diagrama 2-6 " Arquitectura de funcionamiento DT ANSYS "

(Fuente: Seminario Web, Ansys Twin Deployer)

2.4.2 **PREDIX GENERAL ELECTRIC**

GE Digital, cofundador de Digital Twin Consortium, proporciona software que es la columna vertebral de las operaciones de plantas modernas.

El negocio de GE es la infraestructura industrial del mundo. Con Internet Industrial, nuestro conocimiento de dominio y Gemelos Digitales, generaremos valor a lo largo de la vida útil de los activos que construimos. Crearemos Gemelos Digitales en nuestros negocios y líneas de productos. Digital Twin es la visión y el marco que generará un valor diferenciado para GE, nuestros socios y nuestros clientes.

Para aprovechar todo el potencial de valor de Digital Twins, se necesita una plataforma sólida para que vivan, aprendan y funcionen a escala industrial. Los gemelos digitales de GE pueden ejecutarse en varias plataformas industriales en la nube, como AWS y Microsoft Azure. Nuestros Gemelos Digitales están contruidos con nuestra experiencia en el dominio físico como núcleo, combinando lo digital y lo físico en una combinación de datos de los planos de activos y sensores físicos y virtuales en los propios activos, en la ilustración 2-4 se muestra un ejemplo práctico del uso de esta aplicación.

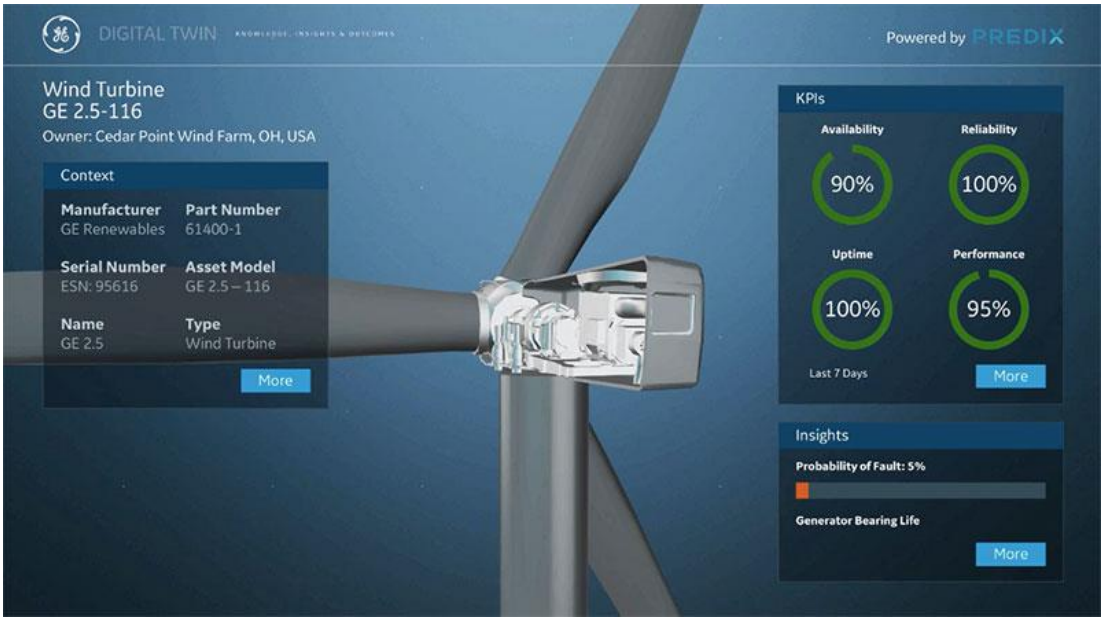


Ilustración 2-4 " Ejemplo de DT de GE "

(Fuente: Seminario Web, General Eclectric)

2.4.3 AUTODESK FORGE

La plataforma Forge ofrece API y servicios que lo ayudan a acceder y usar sus datos de diseño e ingeniería a través de la nube.

“Autodesk Forge en el camino hacia la construcción industrializada y la transformación digital” (Autodesk, s.f.). Se puede usar Forge como plataforma de integración y visualización, lo que incluye la creación de gemelos digitales, “integrando GIS, Big Data, IoT, con visualización de espacios y ayudas en el mantenimiento de equipos y sistemas. Permite mantener sesiones colaborativas de diseño y mejorar la experiencia en el desarrollado de un gemelo digital para la gestión de activos” (Autodesk, s.f.). Autodesk Forge también puede usarse para infraestructuras eléctricas, existen numerosos casos de éxito dando su aproximación en el uso de la IA. un gemelo digital de “FORGE se puede usar para el control total de activos, reducir costes y aumentar la productividad de equipos, reduciendo riesgos y mejorando diseños” (Autodesk, s.f.).

La solución de FORGE (ilustración 2-5) es una plataforma integrada donde múltiples especialidades pueden aprovechar sus funcionalidades.

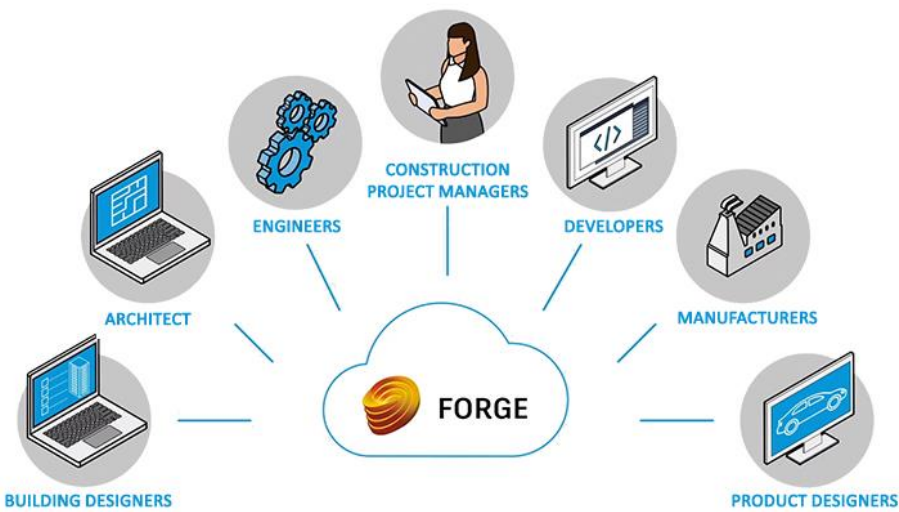


Ilustración 2-5 " Plataforma Autodesk Forge "

(Fuente: Seminario Web, Autodesk)

2.4.4 DASSAULT SYSTEMES VIRTUAL TWIN

Los gemelos digitales son simplemente una forma digital de un objeto; su versión virtual. Sin embargo, las experiencias de gemelos virtuales, que es lo que prometen en Dassault Systèmes a sus clientes más grandes, desde industrias tradicionales hasta investigadores de atención médica y personas que rediseñan sus hogares, son mucho más poderosas que los gemelos digitales. Los

gemelos virtuales brindan la capacidad de modelar en 3D todo lo que te rodea y luego probar y simular para garantizar que tu modelo sea perfecto.

Este es el núcleo de 3DEXPERIENCE Company: crear mundos virtuales que ayuden a los clientes a pensar en soluciones del mundo real para algunos de los mayores desafíos de la humanidad. No se puede decir lo mismo de los gemelos digitales, porque son simplemente representaciones digitales de entidades o sistemas del mundo real, en forma de un objeto de software o un modelo que refleja:

- Un objeto físico único.
- Un proceso.
- Una organización.
- Una persona.
- Lo que se imagine.

Los gemelos virtuales son el futuro porque van mucho más allá que los gemelos digitales. Los gemelos digitales no ofrecen sistemas de extremo a extremo integrados y gemelos virtuales para acelerar la colaboración con el fin de:

Diseñar, simular, producir para el mercado y analizar datos.

- Tecnología de gemelos virtuales en la fabricación

Explicemos a qué nos referimos con el poder de los gemelos virtuales sobre los gemelos digitales con un ejemplo. Imagine que es un fabricante de automóviles que quiere producir un nuevo diseño para el mercado. Puede comenzar a usar la tecnología de gemelos virtuales para diseñar su automóvil. Una vez hecho esto, puede simular para verificar qué tan resistente es su diseño a los elementos externos, como probar cómo resistiría el automóvil bajo un choque en la nieve para determinar si necesita mecanismos de frenado de mejor calidad que cumplan con los estándares de seguridad.

Una vez que su diseño esté listo para pasar al proceso de fabricación, puede usar un gemelo virtual para investigar cómo los diferentes proveedores afectan los niveles generales de emisiones de carbono de su producto final y cómo su cadena de suministro se verá afectada por su elección.

Por último, puede asegurarse de que las fuentes de datos de sus fábricas estén alineadas en todos los ámbitos en cada etapa del proceso, todo mientras colabora con sus colegas y partes interesadas. Todo esto se hace a través de una única plataforma integrada. Una plataforma que no requiere que cambie de su sistema de diseño a su sistema de gestión de datos a su sistema de simulación durante los procesos de desarrollo y fabricación.

Ilustración 2-6 muestra la evolución de los virtual Twin según 3d Experience, Otro diferenciador importante de un gemelo virtual es que establece un ciclo de retroalimentación

continuo, con datos provenientes del producto o proceso en su uso real. Los equipos pueden analizar estos datos, ejecutar pruebas adicionales y realizar cambios para crear una mejora constante y evitar tiempos de inactividad inesperados.



Ilustración 2-6 " 3dExperience Virtual Twin "

(Fuente: Web de 3d Experience, Dassault Systèmes)

CAPÍTULO 3: **APLICACIONES DE MANTENIMIENTO Y PROPUESTA**
DE FORTALECIMIENTO DE RCA USANDO DT Y
SIMULACIÓN

3.1. **INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA SISTEMAS DE GESTIÓN**

Actualmente, la industria está sufriendo una lenta pero drástica transición a modelos productivos alineados a los propuestos en la llamada Industria 4.0. No todos los sectores productivos están preparados para estos cambios, los que lo han logrado tienen un factor en común, han generado cambios desde la alta gerencia y sus sistemas de gestión para poder sacar el máximo provecho a la información de producción.

3.1.1 **EVOLUCIÓN FUJO DE INFORMACIÓN**

En este nuevo escenario los propios sistemas, los activos de ingeniería, van a cambiar profundamente. Pasarán a ser sistemas Ciber-Físicos, CPS o DT, una convergencia entre realidad física y modelo digital desde la misma concepción del sistema, donde diseño, manejo y gestión de ambos planos se hará como una unidad integrada. Este cambio conlleva una serie de retos y oportunidades que marcan, necesariamente, la evolución de la gestión de activos y la gestión del mantenimiento. La siguiente imagen representa el flujo de información en la industria 3.0 el flujo era estrictamente jerarquizado, en cambio, en la visión de la industria 4.0 se presentan flujos de información más complejos y no lineales dándole énfasis a la disponibilidad de esta (obtención de información en el momento oportuno).

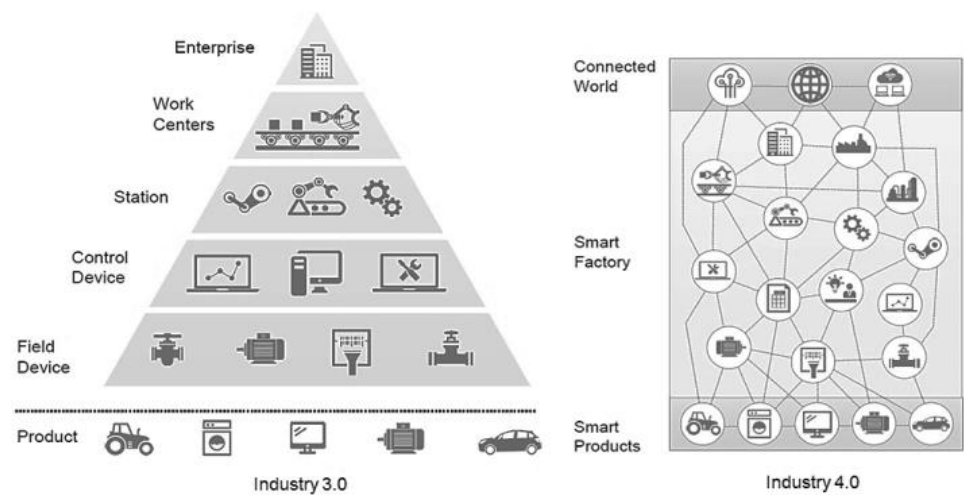


Ilustración 3-1 " Cambios en los flujos de información "

(Fuente: Artículo web modelo de arquitectura de referencia RAMI 4.0, ISA Sección española)

3.1.2 SISTEMA DE GESTIÓN DE ACTIVOS Y TRANSFORMACIÓN DIGITAL

La gestión de activos es el conjunto de actividades y prácticas coordinadas de una organización, por medio del cual maneja sus activos para aprovechar las oportunidades de mejora, en conjunto con la reducción de riesgos importantes, de tal forma de maximizar la generación de valor del negocio.

“En cambio, un sistema de gestión de activos es un conjunto lógico de políticas, planes, procesos de negocios y sistemas de información que se integran, interactuando entre sí, para garantizar la generación del valor de los activos mediante la ejecución sistemática de su gestión.

Estas herramientas, diseñadas por y a la medida de la organización, constituyen las directrices para desarrollar, coordinar y controlar los esfuerzos concretos, enfocados en potenciar la máxima utilidad y valor productivos de los activos durante su vida útil. Este tipo de gestión se basa fundamentalmente en el manejo de información precisa sobre los activos. Esta es el insumo esencial para poner en marcha cualquier sistema de gestión de activos. De allí, que surja la necesidad de implementar sistemas computarizados de gestión de activos y mantenimiento, que faciliten la recolección, organización, gestión, análisis y utilización de los datos para equilibrar su costo, riesgo y desempeño” (Fractal, 2018).

Para que el mantenimiento o la gestión de activos físicos realmente pueda beneficiarse de la transformación de la industria, los cambios deben empezar en el ámbito de la planificación estratégica, se debe mantener un flujo ordenado de información, y mantenerse flexible a integrar tecnologías y nuevas herramientas, es un desafío a nivel organizacional que puede causar una gran repercusión en la empresa y un importante reto técnico, pero es ampliamente recompensado con los beneficios tanto a nivel optimización de uso de recursos como de planificación.

Es importante destacar que cualquiera sea el sistema de gestión de activos, este debe respetar y estar alineado con las normativas actuales de gestión de activos.

3.1.3 MARCO NORMATIVO ACTUAL GESTIÓN DE ACTIVOS

En el año 2004 se publicó la primera versión de PAS 55 (Publicly Available Specification 55), esta especificación se volvió el “primer intento de normalización para el diseño de un sistema organizacional de gestión de activos físicos” (Fractal, 2018), y se transformó en un estándar ampliamente validado que contó con una segunda versión en el año 2008.

La especificación PAS 55, documento de la BSI (British Standard Institute) fue una propuesta de norma precursora de la norma ISO 55001, se destaca por hacer una muy buena clasificación de lo que se considera un activo, dividiendo estos en 5 tipos:

- Activos Humanos.
- Activos Financieros.
- Activos Intangibles.
- Activos de Información.
- Activos Físicos.

En esta clasificación La información pasa a ser tratada como un activo más que debe ser gestionado, esto se alinea con creciente cantidad de data recolectada con los múltiples sensores que acompañan a los activos en la industria actual, de esta forma se puede gestionar, evaluar y procesar para obtener el mayor valor sobre la correcta utilización e interpretación de esta.

En enero de 2014, fue publicada por la Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization) la Norma ISO 55.000. Esta nueva normativa, ampliada, integra “el trabajo adelantado por la PAS 55 y la PAS 55:2008 más los aportes y observaciones provenientes de organizaciones, sectores y sociedades dedicadas al estudio y la práctica de la gestión de activos en todo el mundo” (Fractal, 2018).

Esta norma provee los aspectos generales de la gestión de activos, sus principios y terminología y los beneficios esperados al adoptar la gestión de activos. Establece que la gestión de activos promueve la aportación de valor y define al activo como “un elemento, cosa o entidad que tiene un valor real o potencial para una organización. El valor variará para las diferentes organizaciones y sus accionistas, y puede ser tangible o intangible, financiero o no financiero”, esta cualidad-grado de utilidad debe ser definida e interpretada por la propia organización. En otras palabras, el concepto de valor no depende del activo, sino que es la organización, la que define lo que para ella es el valor, la que determina si algo es un activo o no para dicha organización y en qué medida.

Los cuatro principios de la gestión de activos descritos en la norma son:

- 1) Activos que existen para proveer valor a la organización y las partes interesadas;
- 2) La gestión de activos transforma la intención estratégica en tareas, decisiones, actividades técnicas y financieras;
- 3) El liderazgo y la cultura del lugar de trabajo son determinantes de la percepción de valor;
- 4) La gestión de activos proporciona una garantía de que los activos van a cumplir y desempeñar su función.

Gestión de activos (serie ISO 55000): Proporciona una visión general de la gestión de activos, sus principios y terminología, y los beneficios esperados de la adopción de la gestión de activos.

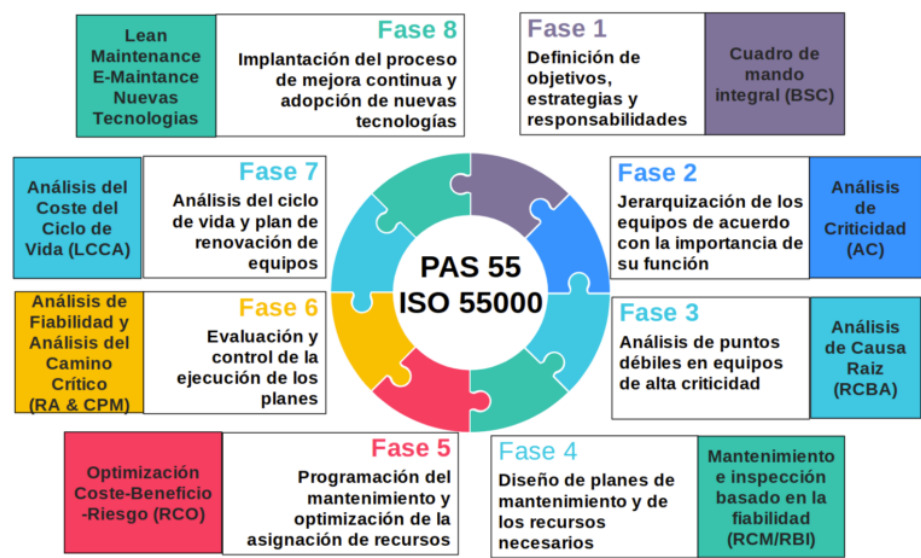


Diagrama 3-1 " Ejemplo de sistema de gestión de activos físicos 8 fases alineado con ISO 55000 y ejemplos de herramientas para cada fase "

(Fuente: ArtículoWeb, Inerco)

La Fase 8 descrita en el diagrama anterior implementa un foco de mejora continua en conjunto con la adopción de nuevas tecnologías, lo cual permite en términos de gestión la puerta abierta a la integración y utilización de herramientas tecnológicas en la gestión del mantenimiento.

Otro punto destacable de la norma ISO 55000 es una recomendación general: “una organización puede optar por gestionar sus activos como un grupo, en lugar de individualmente”, impulsando eficazmente las operaciones hacia la realización de valor, implica equilibrar los costos, riesgos, oportunidades y beneficios contra el deseado rendimiento de los activos. Esta recomendación se alinea con la aplicación de un gemelo digital y los sistemas integrados de información y gestión de una fábrica.

3.1.4 NORMA ISO 55001 Y LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE ACTIVOS

“La Norma ISO 55001 define los requisitos para un sistema de gestión, en donde se provee un marco para establecer políticas de gestión de activos, objetivos y procesos, al igual que permite alcanzar las metas estratégicas de la organización, por medio de un proceso estructurado, eficaz y eficiente que conduce a la mejora continua” (ISO/TC 251 Asset management, s.f.), esto incluye todos los procesos necesarios para apoyar el sistema y sus interacciones. Lo cual otorga la

flexibilidad que se busca para la integración de tecnologías y nuevas herramientas. “Con el fin de ayudar a la creación de valor en ejecución al gestionar costos, desempeño y riesgos.

Las Normas ISO 55000 y 55002 complementan la Norma ISO 55001 al proveer los aspectos generales, los principios y la terminología (ISO 55000) y las directrices para su aplicación (ISO 55002) Ver ilustración 3-2. Esta norma se enfoca en la necesidad de un sistema de gestión, y, por lo tanto, no especifica requisitos financieros, contables o técnicos para la gestión de tipos de activos específicos” (ISO/TC 251 Asset management, s.f.).



Ilustración 3-2 " Conjunto normas ISO 55.000 "

(Fuente: Elaboración propia en base a relación normas)

3.1.5 SISTEMAS DE GESTIÓN DE ACTIVOS FÍSICOS

Una de las decisiones más importantes que tiene una industria es cómo administrar y cuidar sus activos (es decir, equipos, edificios y maquinaria). Esta es una decisión que afecta e involucra transversalmente a todos los miembros de la organización. El gran flujo de data recolectado actualmente hace necesario la utilización de herramientas tecnológicas para poder gestionar y transformar este flujo información en tareas y acciones concretas que aporten valor al proceso, esto hace imposible la gestión como se realizaba antiguamente, ya sea llevando un registro manual o apoyándose en plantillas de Excel y ha dado el paso a sistemas específicos integrados de gestión de mantenimiento tipo (CMMS-GMAO).

Los CMMS han existido por algunas décadas y en la actualidad son los más utilizados en la industria. Nacieron de la necesidad de gestionar las tediosas tareas asociadas con la programación, la gestión y la generación de informes sobre las actividades de mantenimiento. Las soluciones CMMS son un gran punto de partida para las organizaciones. Su valor principal está en la automatización para equipos de mantenimiento o servicio de campo. Ayudan a administrar los flujos de trabajo, los recursos y el enrutamiento, brindan orientación operativa y de reparación, y crean un registro para informes y auditoría.

No obstante, el uso de un CMMS es un complemento al ERP (planificación de recursos empresariales) “Se trata de un software específico para gestionar actividades empresariales rutinarias, como la fabricación, adquisición, relaciones con los clientes, bodegas, contabilidad y cualquier otra gestión. Se utiliza para centralizar los procesos de negocios y permitir un flujo de datos eficiente entre ellos. Además, permite mejorar la eficiencia de los negocios al automatizar las tareas. Finalmente, es esencial para la gestión de negocios de todos los tamaños y de diferentes industrias” (Solex, s.f.).

Existen muchos ejemplos de ERP, el más conocido comercialmente es SAP, este software es un ejemplo perfecto de integración porque a través de sus distintos módulos le otorga flexibilidad y hace posible la disponibilidad de datos y su utilización en todos los ámbitos de la empresa. SAP cuenta con un módulo específico para mantenimiento que puede considerarse como un CMMS, este es el módulo PM (Mantenimiento de Plantas Industriales).

Siguiendo con el ejemplo de SAP a través de la integración de distintos módulos se puede generar un gemelo digital (Ilustración 3-3) en este caso la integración de S/4HANA y el módulo Leonardo que es un sistema de innovación que integra las diferentes tecnologías disruptivas disponibles en el mercado en la plataforma Cloud de SAP.

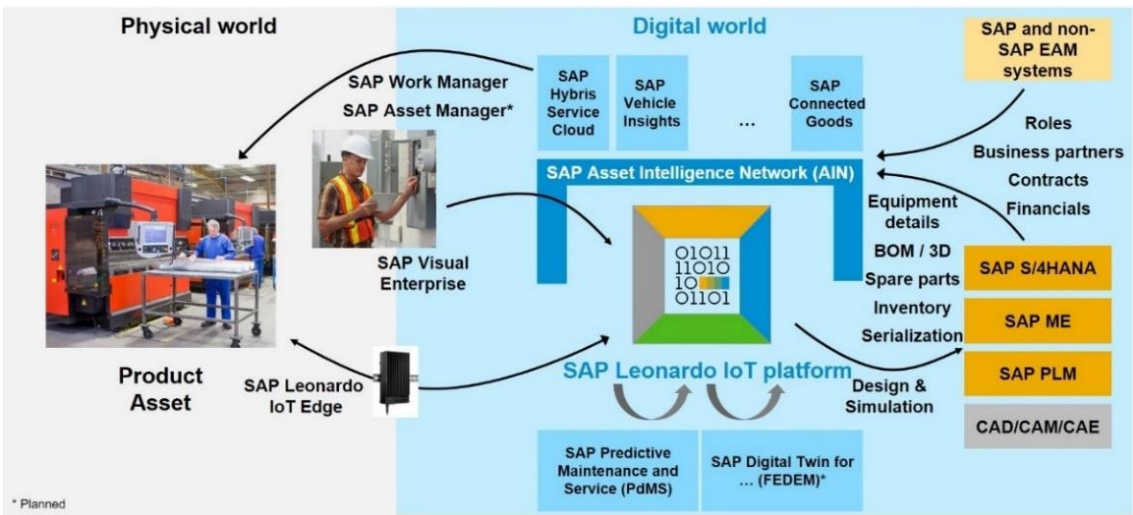


Ilustración 3-3 " Arquitectura de integración SAP Gemelo digital "

(Fuente: Web SAP, artículo capacidades SAP S/4Hana)

En la actualidad, y gracias a la revolución de la información proveniente de los activos y proceso, ha permitido una gestión y toma de decisiones basada en datos más precisa, cambiando el antiguo paradigma de la toma de decisiones basada en la Expertiz de los altos ejecutivos. Este nuevo enfoque se sustenta en captar y sacar el máximo valor a la información, usándolo para gestionar el ciclo de vida de los activos físicos y con un enfoque en el retorno a la inversión.

3.1.6 ECOSISTEMA EAM-APM Y AIP

“EAM a menudo se asocia con un sistema de gestión de mantenimiento computarizado (CMMS), pero una mirada más cercana a EAM versus CMMS revela que son diferentes. Un CMMS puede ser un aspecto de EAM. Se enfoca en centralizar la información para facilitar y automatizar los procesos de gestión del mantenimiento. EAM es un enfoque de gestión del ciclo de vida de los activos que respalda el rendimiento de los activos desde la adquisición hasta la disposición” (IBM, s.f.).

“Implementar un software EAM mejora la eficiencia de los activos y maximiza el retorno de la inversión. Además, un sistema EAM efectivo permite mejorar todos los activos a lo largo de diferentes ubicaciones, optimizando y extendiendo su ciclo de vida. Por lo general, estos softwares son utilizados por grandes empresas que dependen de complejos activos físicos” (Solex, s.f.).

EAM Es el elemento vital de las industrias intensivas en activos, como la energía, la fabricación, el transporte, etc. Las soluciones EAM utilizan datos de todo el ciclo de vida de los activos: desde el diseño y la construcción hasta las operaciones, el mantenimiento y el reemplazo de plantas, equipos e instalaciones. Van más allá del mantenimiento y ayudan a las organizaciones a administrar las necesidades auxiliares en torno a los activos, como la seguridad, las consideraciones ambientales, los inventarios, la capacitación de los trabajadores y muchas otras necesidades de las organizaciones que utilizan activos para generar valor comercial. EAM “Ofrece una amplia variedad de capacidades que se enfoca en los costos, el mantenimiento, monitoreo, gestión y pronóstico con el fin de obtener lo mejor de los activos de una empresa” (Solex, s.f.).

(i) **Uso de la IA y IoT para impulsar el valor comercial**

Por último, las organizaciones que hacen un uso intensivo de los activos suelen tener grandes presupuestos de capital asociados con su equipo. Estas organizaciones continúan trabajando para conectar mejor sus activos con el valor organizacional para aumentar su retorno sobre los activos. Buscan implementar análisis más potentes asociados con el Internet de las cosas (IoT) y la inteligencia artificial (IA) a través de soluciones como Gestión del rendimiento de activos (APM) y Planificación de inversiones de activos (AIP). Estas soluciones conectan la planta de producción con el balance general utilizando datos en tiempo real sobre el estado y la producción de los activos. Lo hacen modelando continuamente el valor y los riesgos de las operaciones, inventarios y resultados de producción actuales. Al poder administrar, predecir y optimizar mejor sus activos, las operaciones pueden desempeñar un papel más importante en los resultados financieros de la empresa. La integración con datos externos, de fabricantes, clima e incluso reparación de equipos suele ser más fácil debido a la apertura de las plataformas asociadas con APM y AIP.

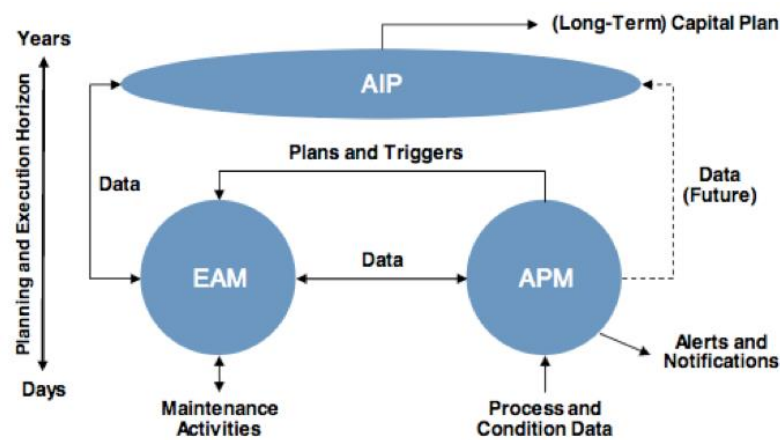


Diagrama 3-2 " Relación EAM-APM y AIP "

(Fuente: Reporte Gartner inc. Strategic Roadmap for Asset Management report)

Las estrategias de gestión de activos han cambiado drásticamente de reactivas a preventivas y, recientemente, a predictivas, lo que ha generado importantes retornos para el gobierno, las empresas de servicios públicos y las empresas intensivas en activos. La integración de la tecnología con datos operativos fiables ha impulsado innovaciones como la gestión del rendimiento de activos (APM). La gestión del rendimiento de los activos aprovecha la tecnología para gestionar los activos y lograr la fiabilidad, la seguridad y la eficiencia operativas.

“Para obtener estos beneficios, las organizaciones deben tener visibilidad sobre el rendimiento de sus activos. Para ello es necesario recopilar datos de diversas fuentes, como sensores, sistemas SCADA, órdenes de trabajo e historial de activos. A continuación, los datos deben ser procesados y analizados para identificar tendencias y patrones. Por último, los resultados del análisis deben utilizarse para mejorar el rendimiento de los activos” (Toyo, 2022).

(ii) **Elementos que componen la APM**

“La gestión de rendimiento de activos se compone de herramientas analíticas muy potentes que se nutren de información, derivada de los procesos empresariales. Esta plataforma se encarga de contextualizar los datos para producir información procesable y, sobre todo, valiosa” (NexusIntegra, s.f.). Parte integral de un APM son los gemelos digitales integrados a este sistema de gestión, lo que permite a “la APM recoger y gestionará los datos, reconocer patrones y, gracias a sus avanzadas tecnologías de Big Data y Machine Learning, elaborar análisis predictivos eficientes.

Estos son algunos de los componentes más importantes en un APM:

- Visión completa del estado de los activos** físicos y gemelos digitales
- Analíticas vanguardistas**, gracias a la Inteligencia Artificial (IA).
- Gestión de compliance** a través de sus herramientas que monitorizan el estado de los activos.

-Uso de plataformas de operaciones integradas con una solución IIoT y OT a través de SCADA (NexusIntegra, s.f.)”

(iii) **APM Gemelos digitales y flujo de información.**

Parte integral de un APM son los gemelos digitales y el flujo de información, integrado de monitoreo de condición y data de mantenimiento

“Dicho esto, la APM puede mejorarse utilizando un sistema de CMMS/ GMAO, que ayuda a optimizar el rendimiento mediante el seguimiento y la gestión de las solicitudes de trabajo, las tareas de mantenimiento preventivo y otra información relacionada. De este modo, se puede evitar fallos en los equipos, tiempos de inactividad y otros problemas que pueden afectar negativamente a al negocio” (Toyos, 2022).

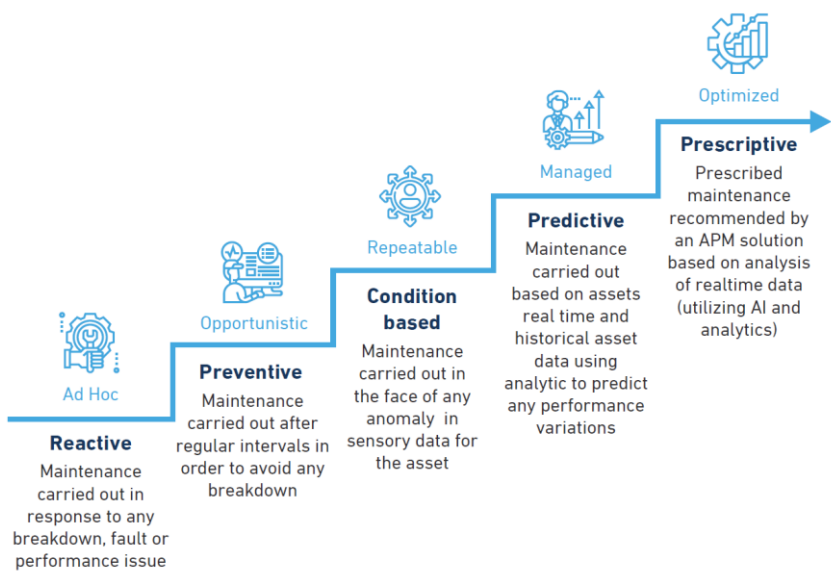


Ilustración 3-4 " Niveles de Madures APM Según integración información "

(Fuente: Reporte IDC-GE, APM and Digital Twin Solutions Future of the Oil and Gas Sector)

Las soluciones APM originalmente complementaron los métodos tradicionales de gestión de activos y se utilizaron para monitorear ciertas condiciones. Sin embargo, las soluciones de APM han avanzado con el tiempo al ritmo de la evolución de tecnologías IoT y AI/ML. Las soluciones APM apuntan principalmente a mejorar la confiabilidad y disponibilidad de activos físicos mientras minimiza el riesgo y los costos operativos. La imagen anterior (ilustración 3-4). Describe enfoques de mantenimiento basados en este tipo de gestión, desde los más básicos hasta los más avanzados.

“Mientras que un sistema APM puede ayudar a mejorar el rendimiento, la integración con un sistema de gestión de mantenimiento puede dar un paso más allá al proporcionar características

y capacidades adicionales. Por ejemplo, un sistema GMAO puede realizar el seguimiento y la gestión de los niveles de inventario, para que puedas asegurarte de tener a mano las piezas de repuesto adecuadas cuando las necesites. Un sistema GMAO también puede realizar el seguimiento y la gestión de las solicitudes de órdenes de trabajo, programar las tareas de mantenimiento preventivo y proporcionar otras capacidades que pueden mejorar aún más el rendimiento” (Toyos, 2022).

La estrategia APM proporciona una forma para que las organizaciones administren e implementen estrategias de activos de una manera escalable y repetible. Utilizando metodologías basadas en riesgos, la solución estandariza cómo los usuarios definen acciones estratégicas y reduce los riesgos esas acciones mitigan. La solución luego permite a los usuarios implementar esas estrategias para sistemas de gestión de activos empresariales o dentro de otros módulos en aplicaciones APM. La solución incluye varios módulos (mantenimiento centrado en la confiabilidad [RCM], falla, análisis de modos y efectos, gestión de estrategias, optimización de estrategias y ciclo de vida, análisis de costos).

A modo de síntesis de las tecnologías mencionadas anteriormente se presenta la siguiente tabla comparativa:

Plataformas tecnológicas	CMMS Sistemas computarizados de gestión de mantenimiento	EAM Gestión de activos corporativos	APM Gestión de desempeño de activos
Síntesis	Sistemas para la programación, gestión y reportes de actividades de mantenimiento. Automatización para equipos de mantenimiento y/o servicio de campo. Gestión de flujos de trabajo, provisión de recursos y enrutamiento, provisión de guía operativa y de reparación, y la creación de un registro para reportes y auditoría.	Sistemas utilizando datos en todo el ciclo de vida del activo: diseño, construcción, operaciones, mantenimiento y remplazo. Gestión de necesidades auxiliares de dispositivos, tales como seguridad, consideraciones ambientales, inventarios y capacitación de trabajadores para asegurar que los activos otorguen valor de negocio. Integración con ERP.	Sistemas para rastreo y análisis de <i>desempeño</i> de activos para incrementar disponibilidad y reducción de riesgos. Conexión de tiempo real y datos históricos para predecir y optimizar los resultados. Análisis poderoso con Internet de las Cosas (IoT), Inteligencia Artificial (AI), Aprendizaje máquina, Simulación y Digital Twin. Monitoreo de desempeño de activos en tiempo real, y conectar el piso de producción con la hoja de resultados, usando datos sobre salud y salida de activos. Predicción y prevención de fallos. Evaluación de inversión y estrategia de activos. Integración con otros negocios, automatización, control, manufactura, clima y sistemas de reparación de equipos.
Ajuste óptimo	Cualquier empresa con activos para mantener.	Empresas intensivas en activos, P. Ej.: Energía, Servicios, Manufactura y Transportes.	Empresas centradas en activos en las que el desempeño de activos tiene un impacto directo en la salida del negocio, P. Ej.: Energía, Servicios, Manufactura y Transporte.
Enfoque de solución	Gestión de mantenimiento	Infraestructura operativa	Soporte a decisiones
Capacidades	Programación de mantenimiento Gestión de órdenes de trabajo Planeación de recursos de mantenimiento Gestión de servicio en campo	Mantenimiento preventivo Seguridad y cumplimiento de activos Gestión de información de activos Capacitación de trabajadores	Mantenimiento basado en condiciones Mantenimiento predictivo Mantenimiento prescriptivo Mantenimiento centrado en fiabilidad Análisis de ciclo de vida de activos
Medición	Costo relacionado con activos Actividad relacionada con activos	Valor de activos Estabilidad de activos	Retorno de activos (ROA) Crecimiento de negocio Mejora continua

Tabla 3-1 " Síntesis CMMS-EAM-APM "

(Fuente: Artículo web Engineering Industries eXcellence Gestión del desempeño de activos)

“Es evidente que se está produciendo un cambio fundamental en los modelos operativos existentes. Lo que trajo consigo una reinvencción digital en industrias intensivas en activos, que está cambiando los modelos operativos de una manera disruptiva, lo que requiere una vista integrada, física y digital de los activos, equipos, instalaciones y procesos. Los gemelos digitales son una parte vital de esa realineación” (IBM, s.f.). “La APM proporciona a las organizaciones visibilidad

y control sobre las operaciones y el mantenimiento a través la integración de los DT de sus activos. El objetivo de la APM es reducir los gastos de explotación, manteniendo o mejorando la salud, la fiabilidad y la seguridad de los activos” (Toyos, 2022).

Actualmente, el uso de APM se centra en los activos más importantes, por ejemplo en las turbinas eólicas de un parque de generación eólico. Pero la tendencia es que a medida que la industria se vuelva cada vez más cercana al modelo planteado por la cuarta revolución industrial (con miras a la implementación de la 5° revolución), el nivel de conexión de los equipo y los sistemas informáticos hará que este tipo de gestión de activos sea el más habitual y un mayor número de empresas lo adopten, no solamente las industrias más intensivas en activos.

Sea cual sea la herramienta que de soporte al sistema de gestión de activos físicos puede conducir a un gemelo digital, sus capacidades en mantenimiento dependerán del nivel de integración con el sistema de información, ya sea a través de un CMMS que necesitara un gemelo externo o un APM que incorpora los gemelos digitales como parte integral de su ecosistema.

3.2. EVOLUCIÓN DE LAS ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO

La llegada de la revolución industrial trajo consigo no solo un aumento considerable de la productividad, sino también en aumento en la complejidad de los equipos mecánicos, con cada tecnología que se integra a la industria los equipos van ganando en productividad, pero también en la complejidad. En este contexto, las máquinas necesitaban un mantenimiento más especializado y cada vez más elaborados, así fue como se pasó de las estrategias de mantenimiento reactivas, a crear planes de mantenimiento preventivo, luego proactivos y hoy en día estrategias orientadas a la predicción.

Según ISO 14224:2016 las tipologías de mantenimiento se dividen de la siguiente manera

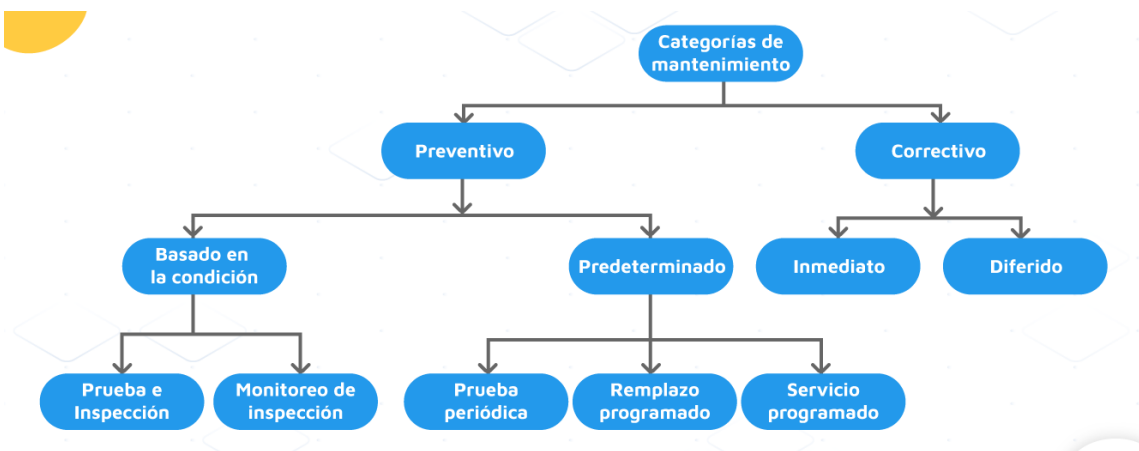


Ilustración 3-5 " Tipologías de mantenimiento ISO 14224:2016 "

(Fuente: Material curso Conceptos de mantenimiento, Fractal Academy)

Así también La aplicación de la tecnología ha ayudado a mejorar la aplicación de las distintas técnicas de mantenimiento, ya sea generando nuevas herramientas o tecnologías que permiten agilizar los procesos y gestión del mantenimiento.

Los tipos de mantenimiento que han sufrido una mayor evolución o que se formularon a partir de la integración tecnológicas son los siguientes.

3.2.1 **MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN**

CBM (Condition Based Maintenance) tiene su punto de partida “en la década de los 50 fue introducido por primera vez por IRD Mechanalysis, distinguiéndose del mantenimiento preventivo tradicional, debido a que este último realiza intervenciones en los equipos a intervalos fijos, a diferencia del basado en condición que su premisa es la condición en que se encuentra el activo, es decir, actuar ante la evidencia de necesidad” (Toro, 2020).

A continuacion el diagrama 3-3 representa el flujo de trabajo general del mantenimiento basado en condicion o CBM

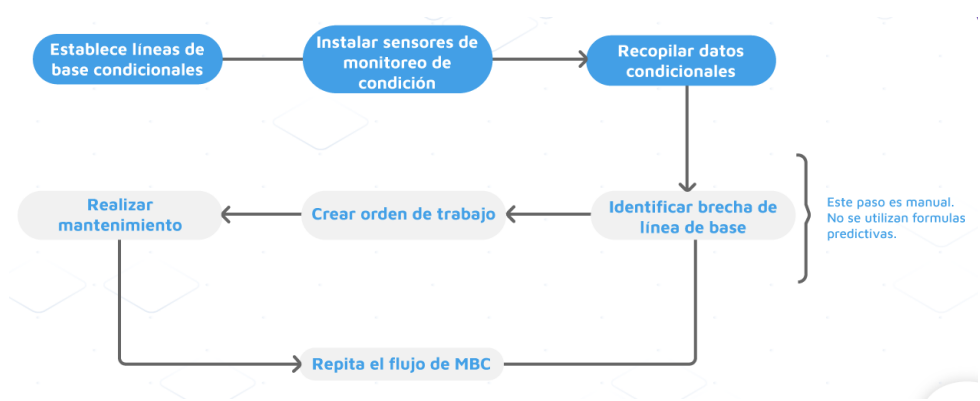


Diagrama 3-3 " Flujo general de trabajo de mantenimiento CBM "

(Fuente: Material curso Conceptos de mantenimiento, Fractal Academy)

Según la tipología actual de la norma ISO 144224:2016 se distinguen dos Sub-Categorías del Mantenimiento Basado en Condición

(i) **Mantenimiento por Prueba e Inspección**

Es el enfoque clásico y consiste en la realización de diagnósticos temprano de los activos a través de pruebas e inspecciones programadas. Esto utilizando las herramientas de monitoreo de condición como lo son: Detectores de calor infrarrojo – Termografía - Detectores de vibraciones mecánicas- Medidores de calidad de aceite, etc.

(ii) **Mantenimiento por Monitoreo de Condición**

Consiste en la inspección continua de los activos mediante los datos obtenidos con instrumentos de monitoreo en línea IOT, al realizar monitoreo en tiempo real se reducen los tiempo de inactividad, al tomar decisiones más ágiles, interviniendo en la etapa de falla potencial (las actividades de mantenimiento se realizan o programan en función del estado del activo) y evitando que el equipo llegue a la falla funcional (Grafico 3-1).

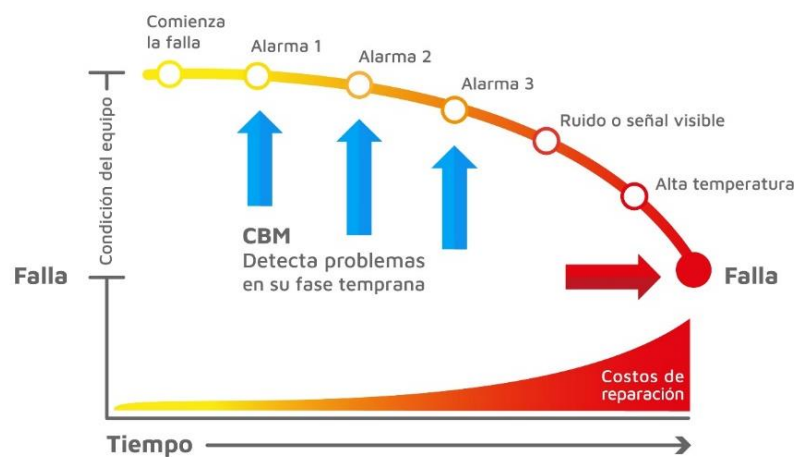


Gráfico 3-1 " Curva P-F "

(Fuente: Material curso Conceptos de mantenimiento, Fractal Academy)

3.2.2 MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Tiene sus orígenes en los años 60, se origina luego de la introducción de las técnicas de CBM, Usualmente es confundido con este último debido dado que ocupa datos de monitoreo de condición para basar sus pronósticos, pero también otros métodos como la generación de gráficos de tendencias y análisis de datos para tratar de predecir el comportamiento futuro de los equipos.

Su objetivo es predecir el futuro comportamiento del activo con el fin de adelantarse al momento en que dejara de ejecutar sus funciones de forma óptima. Este tipo de mantenimiento aplicado a los equipos industriales evalúa el estado de la maquinaria basándose en la recopilación de datos y condición de los activos, que luego son procesados a través de un modelo matemático, Para crear dicho modelo se necesitan medir parámetros que muestren una relación con el ciclo de vida del equipo. (ejemplo: vibración de los cojinetes, temperatura de las conexiones eléctricas, tiempo de proceso, etc.). En el siguiente diagrama se presenta un flujo de trabajo típico de un mantenimiento predictivo.



Diagrama 3-4 " Flujo de trabajo mantenimiento predictivo "

(Fuente: Material curso Conceptos de mantenimiento, Fractal Academy)

Este tipo de mantenimiento es muy utilizado en la actualidad, debido a que no depende de una frecuencia o de la falla de algún componente, sino que se predice la condición exacta en la cual se debe programar el mantenimiento en función a los parámetros analizados y el estado actual del equipo.

Este tipo de manteniendo ha avanzado drásticamente con la incorporación Machine Learning, y la gran cantidad de sensores disponibles para crear modelos predictivos cada vez más exactos

3.2.3 **MANTENIMIENTO PRESCRIPTIVO**

El mantenimiento prescriptivo es una técnica avanzada de mantenimiento que utiliza el análisis de datos en tiempo real, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático para predecir e identificar patrones y tendencias en el rendimiento del equipo Con esta información se pueden tomar decisiones informadas sobre el momento adecuado para realizar el mantenimiento, qué tipo de mantenimiento realizar y cómo optimizar el rendimiento en general.

A diferencia del mantenimiento predictivo, que se centra en prevenir fallos, el mantenimiento prescriptivo va más allá al proporcionar recomendaciones específicas sobre las acciones que se deben tomar para optimizar el rendimiento del equipo o sistema.

El mantenimiento prescriptivo se utiliza cada vez más en una variedad de sectores, desde la industria manufacturera hasta el transporte y la logística, ya que puede reducir los costos de mantenimiento, aumentar la eficiencia operativa y mejorar la seguridad del personal y del equipo.

3.2.4 MANTENIMIENTO CBM+ Y PHM

La norma aún no recoge estas tendencias, por lo cual se genera una confusión en los conceptos y la diferencia entre CBM y mantenimiento predictivo, la mayoría de los textos concuerda en que CBM solo se basa en la interpretación de los datos directos de los sensores, y cuando se aplican modelos matemáticos e inteligencia artificial pasa programar el mantenimiento pasa a ser predictivo, en la literatura el mantenimiento predictivo también se puede encontrar como CBM+, ya que de cierta forma es una evolución potenciada de CBM.

Otro concepto que tiende a la confusión es un mantenimiento prescriptivo llamado PHM, por sus siglas en inglés "Prognostics and Health Management", este se centra en la monitorización continua de la salud de la maquinaria para identificar tempranamente los posibles fallos y prevenir el tiempo de inactividad no planificado. PHM utiliza técnicas de análisis de datos avanzadas, como el aprendizaje automático y la inteligencia artificial, para identificar patrones y tendencias en los datos de la maquinaria y pronosticar el RUL (Remaining Useful Life), que en español significa Vida Útil Restante. El RUL se refiere a la cantidad de tiempo que queda antes de que un componente, equipo o sistema falle o llegue al final de su vida útil.

Tanto el mantenimiento predictivo como el prescriptivo se han visto altamente beneficiado gracias a la implementación de gestión del rendimiento de los activos APM/DT, ya que se forma “un puente entre el software de gestión de mantenimiento CMMS/GMAO. Y se utilizan los datos recogidos por los sistemas CMMS/GMAO para identificar patrones en el rendimiento de los activos y luego recomendar acciones para mejorar el rendimiento. Estas acciones pueden incluir tareas de mantenimiento preventivo, modificaciones en los procedimientos operativos o incluso la sustitución del activo” (Toyos, 2022). En el siguiente gráfico se presenta una síntesis de la evolución de la tecnología de mantenimiento.

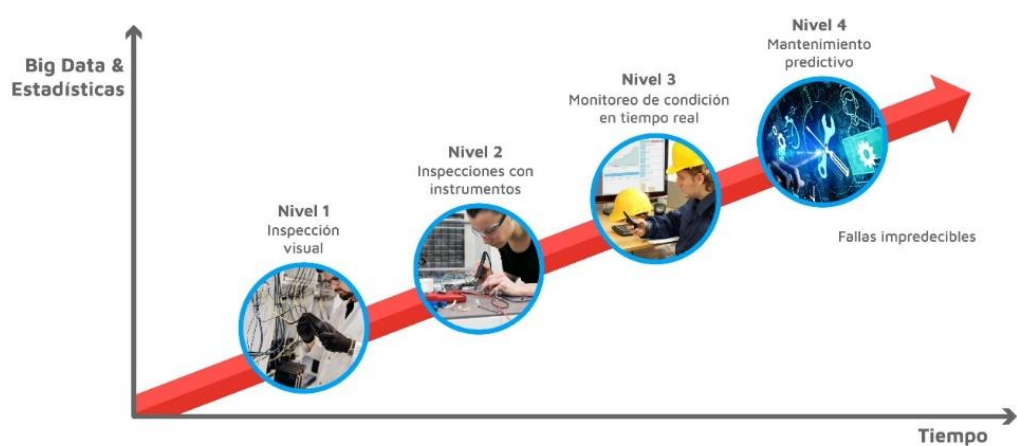


Gráfico 3-2 " Evolución de la tecnología de mantenimiento "

(Fuente: Material curso Nuevas Tendencias mantenimiento 4.0, Fractal Academy)

3.2.5 MANTENIMIENTO INTELIGENTE

De forma general el mantenimiento que se basa en datos de operación con la integración de tecnologías como machine Learning e IA también es denominado como Mantenimiento Inteligente, el mantenimiento predictivo y prescripto forman parte de este tipo de mantenimiento.

El mantenimiento inteligente conecta los dispositivos críticos de forma inalámbrica para una vigilancia continua mediante dispositivos como los IoT, reacciona a eventos inusuales de las máquinas y del entorno de producción y predice la necesidad de mantenimiento basándose en datos recolectados en un sistema integrado como los sistemas GMAO/CMMS o APM.

Una de las tendencias más interesantes a mencionar dentro de los denominados mantenimientos inteligentes es el mantenimiento lean inteligente.

El Mantenimiento Productivo Total o TPM por sus siglas en inglés y la gestión Lean son hasta ahora dos de las estrategias y conceptos más usados en el mantenimiento. Sin embargo, según Bernerstaetter et al. 2018, con el fin de mantenerse al día con los cambios tecnológicos y los conceptos mantenimiento enfocados en la industria 4.0 es que el mantenimiento lean Clásico evoluciona como el mantenimiento Lean inteligente o LMS por sus siglas en inglés.

Este tipo de mantenimiento Lean inteligente combina la filosofía lean y el mantenimiento inteligente para ofrecer un modelo para un sistema de gestión de mantenimiento dinámico, inteligente y orientado a la generación de valor. Este se caracteriza por el uso centrado y económicamente significativo de la tecnología, la mejora del aprendizaje.

El enfoque LSM es un método de mantenimiento avanzado que se centra en el aprendizaje, el riesgo y la orientación de los recursos para aumentar la eficiencia y la eficacia de la gestión de los activos. Esto crea una asociación entre los departamentos de producción y mantenimiento que aumenta el valor.

Este mantenimiento se apoya en los sistemas de gestión (GMAO o APM).

3.2.6 SELECCIÓN DE TIPO DE MANTENIMIENTO

No todos los equipos tienen la misma importancia en una planta industrial. Es un hecho que unos equipos son más importantes que otros. Como los recursos de una empresa para mantener una planta son limitados, en la mayoría de los casos debemos destinar la mayor parte de los recursos a los equipos más importantes, dejando una pequeña porción a los equipos que menos pueden influir en los resultados de la empresa, por esto razón surgieron diferentes formas de jerarquización de equipos. En el siguiente diagrama se aprecia las formas más comunes de jerarquización

basándose en riesgo, ya sea por confiabilidad/ probabilidad de falla o por las consecuencias que puede generar el fallo del equipo.



Diagrama 3-5 " Factores determinación de riesgo "

(Fuente: Artículo Web Análisis de Criticidad Integral de Activos, Revista Predictiva 21)

Existen diferentes técnicas para dimensionar el riesgo, todas ellas enmarcadas en tres modalidades técnicas “Cualitativas”, “Semi- Cuantitativas” y técnicas “Cuantitativas”. Según estos criterios se pueden definir una serie de herramientas que permiten dar respuesta a dichos requerimientos de la gestión de activos de una forma práctica Por ejemplo, herramientas como Diagnósticos de Integridad, los Estudios de Fiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (RAM), los Estudios de Mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM) y los Estudios de Inspecciones basados en el riesgo (RBI) permiten maximizar el rendimiento operacional de los activos en base al nivel de riesgo que la organización está dispuesta a aceptar.

La aplicación de APM/ y gemelos digitales permite realizar una mejor gestión de estos riesgos con el fin alcanzar el máximo equilibrio entre Rendimiento operacional y riesgo. Esta aplicación da forma a El mantenimiento inteligente y este se construye en torno a un modelo predictivo en el que la maquinaria se mide y evalúa las 24 horas del día. De este modo, las necesidades de mantenimiento pueden calcularse en tiempo real antes de que la situación se agrave. Las reacciones rápidas basadas en las alarmas o en las acciones automatizadas del sistema de control minimizan los riesgos de bloqueos de la producción y de fallos catastróficos a las máquinas.

Al utilizar los datos, el mantenimiento pasa de ser reactivo a proactivo, lo que mejora la disponibilidad de las máquinas y alarga su vida útil. A largo plazo, esta forma de operar puede reducir drásticamente los costes de mantenimiento. Esto incluye los costes causados por los fallos en la producción, ayudando a optimizar la gestión de los recursos económicos

En la práctica el paradigma mantenimiento actual está ligado al concepto de Mix de Mantenimiento (MMx, Maintenance Mix) esto basado en un conjunto de técnicas y herramientas de mantenimiento como por ejemplo RCM, CBM, CBM/PHM con el fin de Optimizar el riesgo-coste-valor del sistema donde el activo se integra considerando toda su vida útil y de manera dinámica, es decir, ajustando los objetivos de optimización en función del momento y horizonte de gestión considerado. Esto se logra por medio de la utilización de tecnologías disponibles. Una combinación adecuada de todos los tipos de mantenimiento, un MMx, adaptado de manera inteligente a las situaciones dinámicas y de cambio en la organización.

Parte de la gestión del riesgo está en decidir qué nivel de conocimiento y monitorización se necesita sobre los diferentes activos. Es evidente que un “Smart Maintenance” va a requerir un uso extensivo de soluciones de PdM o CBM. Pero esta presencia tendrá que ser equilibrada con el resto de los tipos y/o políticas, obteniendo el MMx adecuado a cada momento del sistema, a su riesgo-coste-valor. Las soluciones PdM/CBM son aplicadas, por lo general de manera aislada, en casi todas las ocasiones, dando respuesta a un problema o modo de fallo muy específico. Esto reduce en parte el valor que estas aportan.

Nuevamente tomando como ejemplo de buenas prácticas la filosofía de mantenimiento LEAN Inteligente habla sobre la selección de un tipo de manteniendo y nos dice lo siguiente:

Los siguientes criterios caracterizan la categoría de gestión en LSM: (Biedermann,2008; Kinz & Biedermann, 2015)

- Todas las estrategias posibles -desglosadas, preventivas, basadas en la condición, predictivas y proactivas se mezclan de forma específica para cada activo bajo perspectivas económicas y orientadas al riesgo.
- La combinación de estrategias de mantenimiento se adapta dinámicamente a las condiciones cambiantes.
- Se utilizan herramientas de evaluación relativas a los criterios de riesgo y coste para clasificar todos los activos.
- El proceso de selección de estrategias se integra en el bucle de control del mantenimiento.

3.3. RESUMEN DE VENTAJAS DEL USO DE SISTEMAS DT/APM EN MANTENIMIENTO

Actualmente, uno de los mayores problemas de sistemas de monitoreo de condición no integrados es la gran cantidad de datos resultantes de la operación del activo, esto quiere decir que a lo mejor estamos gastando el tiempo y recursos tomando información que no es particularmente valiosa en implementar confiabilidad y o hacer pronósticos. Ya que información derivada no queda

integrada dentro del todo en las decisiones del cuidado de la máquina. Un sistema integrado como un APM/digital Twins permite fácilmente identificar patrones de datos anómalos y enviar alertas o pronosticar fallas en base a esto.

A modo de síntesis se presentan las ventajas más notables al implementar estos sistemas.

(i) **Historial de activos**

Una característica importante de un gemelo digital es que captura el historial del activo real. Recuerde que el modelo de gemelo digital se actualiza periódicamente para representar el estado actual del activo real. Con el tiempo, estos estados pasados se convierten en la historia del activo.

Si usa el gemelo digital para la clasificación de fallas, el historial capturado por cada gemelo digital puede ser los datos operativos como ejemplo de una bomba específica y su estado correcto y defectuoso. En el futuro, puede comparar los datos operativos de una bomba con los historiales de gemelos digitales de otras bombas para comprender cómo se comportaron ante fallas similares y el efecto en la eficiencia.

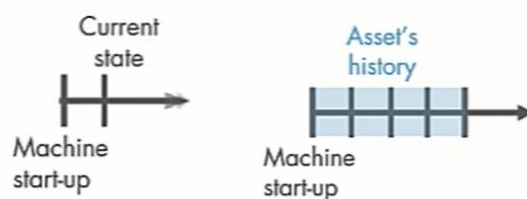


Ilustración 3-6 " generación de Historial operacional "

(Fuente: Artículo Web Que son los gemelos digitales , MATLAB mathworks)

(ii) **Optimización de operaciones y Estrategias de mantenimiento**

A través de un gemelo integrado a un sistema de gestión tipo APM la planificación de las tareas de mantenimiento se realiza sin esfuerzo y con rapidez, ya que el sistema de mantenimiento inteligente regula automáticamente los planes en función de los datos recogidos y en tiempo real. Los datos guían y optimizan el mantenimiento y los recursos de producción, permitiendo que el mantenimiento se programe de forma que se minimicen los bloqueos de producción.

(iii) **Simular escenarios futuros**

Como los gemelos digitales lo ayudan a comprender la historia de los activos, también lo ayudan con la planificación futura. Puede usar gemelos digitales para simular cientos de escenarios futuros para ver cómo factores como el clima, el tamaño de la flota o las diferentes condiciones operativas afectan el rendimiento.

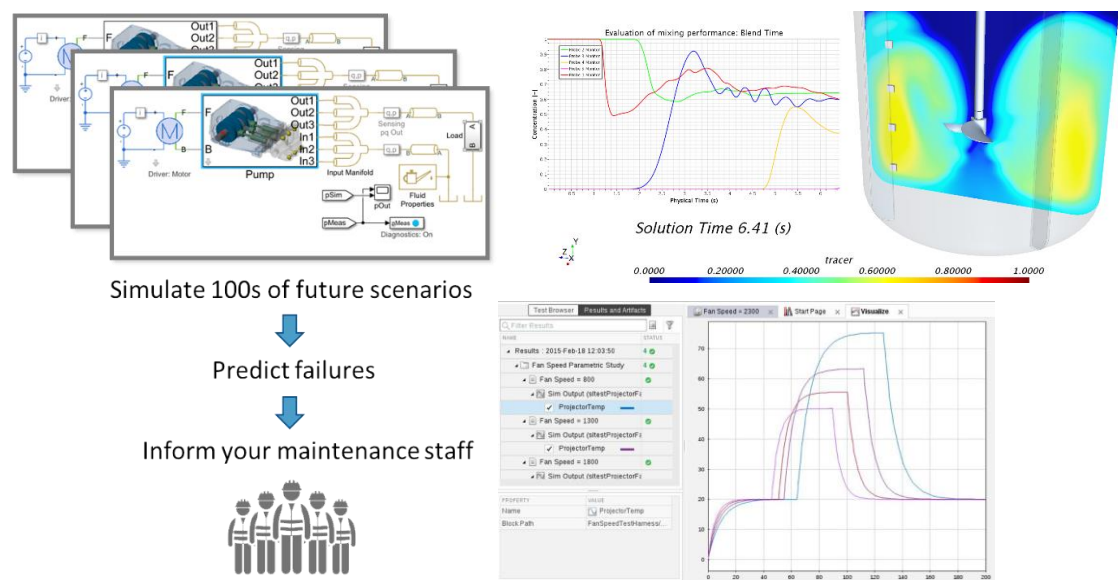


Ilustración 3-7 " Simulación de escenarios "

(Fuente: Artículo Web Que son los gemelos digitales , MATLAB mathworks)

(iv) **Otras ventajas conceptos canto del cisne y cisne negro**

En el contexto del mantenimiento, el "canto del cisne" se refiere a los últimos momentos en que un equipo o sistema es capaz de funcionar correctamente antes de sufrir un fallo o avería. Cuando un equipo o sistema se encuentra en el "canto del cisne", se presentan síntomas inequívocos de que algo está fallando (temperatura, vibraciones fuera de rango, ruido excesivo, etc.). Esto se puede evitar teniendo un correcto control y supervisión sobre los dispositivos de monitoreo de condición, usualmente configurando alarmas para realizar un seguimiento adecuado del estado de los equipos y sistemas, estas alarmas se disparan al detectar alguna señal fuera de los rangos previamente establecidos, así se evita llegar al fallo total y se consigue poder planificar el mantenimiento de manera adecuada minimizando el riesgo de fallos inesperados.

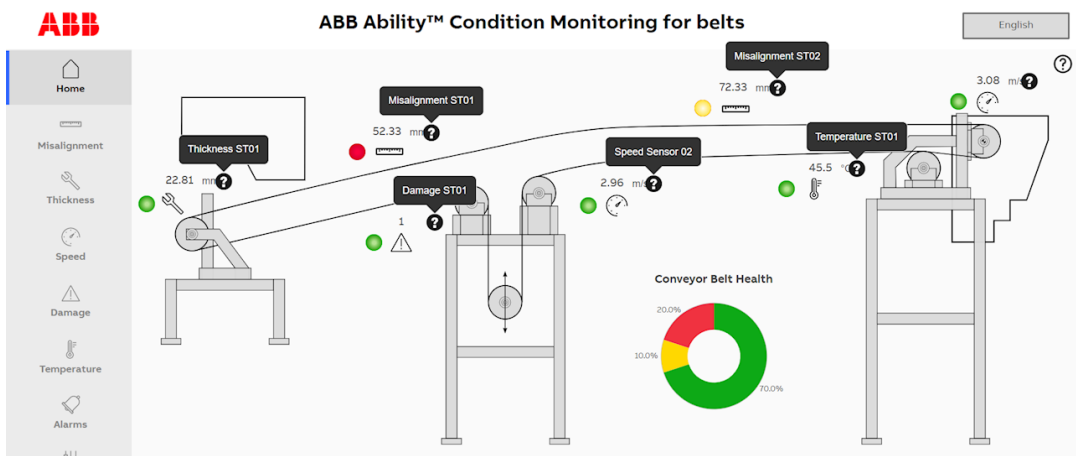


Ilustración 3-8 " Ejemplo monitoreo de condición con set de alarmas correas transportadoras "

(Fuente: Ejemplo Dashboard del operador - ABB Ability™ Condition Monitoring for belts , ABB)

Un "Black swan" o Cisne negro es un término que se utiliza para referirse a un evento inesperado y de gran impacto, que suele tener una alta probabilidad de ocurrencia, pero que es muy difícil de predecir. En el contexto del mantenimiento, un Black swan puede ser un fallo o un problema imprevisto que tiene un gran impacto en la disponibilidad y el funcionamiento de un sistema o equipo, y que puede generar costos significativos para la empresa, como ejemplo el fallo de un equipo crítico en una planta de producción, como una máquina de envasado o un horno, que deja de funcionar de manera inesperada y provoca una paralización de la línea de producción durante varios días.

Para minimizar el impacto de este tipo de eventos, es importante realizar un mantenimiento preventivo adecuado y tener en cuenta el riesgo de fallos inesperados en la planificación, nuevamente este tipo de fallas si bien se caracterizan por ser imprevisibles puede evitarse bajo un sistema de supervisión APM/Digital Twins dado que al detectar parámetros anómalos se disparan alertas inmediatas, y se sugieren acciones correctivas con el fin de evitar este tipo de eventos, también las capacidades de simulación de escenarios ayudan a simular condiciones anómalas para evitar que ocurran en el activo real o ayudar a generar planes de contingencia más robustos. Esto puede incluir y guiar la realización de pruebas de resistencia a fallos para evaluar la robustez y la resiliencia del sistema ante eventos imprevistos.

3.4. EJEMPLO PRÁCTICO DE APLICACIÓN DE UN DT EN MANTENIMIENTO

Prototipo de despliegue de tecnología gemelo digital y Iot en la industria petrolera (Empresa Baker Hughes)

Contexto Operacional

La empresa tiene sitios de pozos en diferentes ubicaciones donde opera múltiples bombas (montadas en un semirremolque) en para extraer petróleo y gas del suelo.



Ilustración 3-9 " Ejemplo camiones con bombas de desplazamiento positivo "

(Fuente: Casos Prácticos, MATLAB mathworks)

El gemelo digital de ejemplo está integrado en diferentes niveles y puede desglosarse como: (imagen 3-9 a la derecha) de arriba abajo, Un componente de un sistema como una válvula, el sistema en cuestión, la bomba, o un sistema de bombas compuesto por múltiples bombas todos los camiones de la flota (o pueden pertenecer a un proceso dentro de una fábrica).

“En los períodos de máxima demanda, las cuadrillas de Baker Hughes trabajan las 24 horas del día para explotar los depósitos de petróleo y gas natural. En un solo sitio de pozo, hasta 20 camiones pueden operar simultáneamente, con bombas de desplazamiento positivo que inyectan una mezcla de agua y arena a altas presiones en las profundidades de los pozos perforados. Estas bombas y sus partes internas, incluidas válvulas, asientos de válvulas, sellos y émbolos, son costosas y representan alrededor de \$100.000 USD del costo total de \$1,5 millones USD del camión.

Para monitorear las bombas en busca de un desgaste potencialmente catastrófico y predecir fallas antes de que ocurran, Baker Hughes analiza los datos del sensor de la bomba creando un gemelo digital con MATLAB® y aplica los algoritmos de aprendizaje automático de MATLAB” (Mathworks, s.f.).

Desafío

Si un camión en un sitio activo tiene una falla en la bomba, Baker Hughes debe reemplazar el camión de inmediato para garantizar un funcionamiento continuo. Enviar camiones de repuesto a cada sitio le cuesta a la empresa decenas de millones de dólares en ingresos que esos camiones podrían generar si estuvieran en uso activo en otro sitio. La incapacidad de predecir con precisión cuándo las válvulas y las bombas requerirán mantenimiento sustenta otros costos. El mantenimiento demasiado frecuente desperdicia esfuerzo y da como resultado que las piezas se reemplacen cuando aún se pueden usar, mientras que el mantenimiento demasiado infrecuente corre el riesgo de dañar las bombas sin posibilidad de reparación.

Los ingenieros de Baker Hughes querían desarrollar un sistema que pudiera determinar cuándo una máquina estaba a punto de fallar y necesitaba mantenimiento. Para desarrollar este sistema, el equipo necesitaba procesar y analizar hasta un terabyte de datos recopilados a 50.000 muestras por segundo de sensores instalados en 10 camiones que operan en el campo. A partir de este gran conjunto de datos, necesitaban identificar los parámetros que eran útiles para predecir fallas.

Solución

Los ingenieros de Baker Hughes utilizaron MATLAB para desarrollar un software de control del estado de las bombas que utiliza análisis de datos para el mantenimiento predictivo.

Trabajando en MATLAB, el equipo de Baker Hughes analizó los datos importados para determinar qué señales de los datos tenían la mayor influencia en el desgaste del equipo. Este paso incluyó la realización de transformadas de Fourier y análisis espectrales, así como la filtración de grandes movimientos del camión, la bomba y el fluido para detectar mejor las vibraciones más pequeñas de las válvulas y los asientos de las válvulas.

Para automatizar el procesamiento de casi un terabyte de datos recopilados, el equipo escribió scripts de MATLAB que ejecutaron durante la noche. Los ingenieros descubrieron que los datos capturados de los sensores de presión, vibración y sincronización eran los más relevantes para predecir fallas en las máquinas.

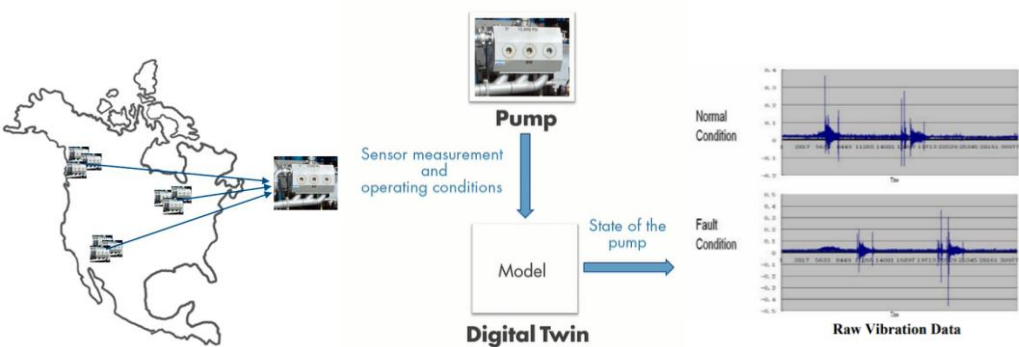


Ilustración 3-10 " Ejemplo Despliegue de bombas-DT-Monitoreo condición "

(Fuente: Casos Prácticos,MATLAB mathworks)

En colaboración con el ingeniero de asistencia técnica de MathWorks, el equipo evaluó varias técnicas de aprendizaje automático mediante Statistics and Machine Learning Toolbox™ y Deep Learning Toolbox™. Esta evaluación inicial mostró que las redes neuronales produjeron los resultados más precisos. El grupo creó y entrenó una red neuronal para usar datos de sensores para predecir fallas en las bombas. Validaron este modelo usando datos adicionales del campo que no se usaron para construir el modelo.

Las pruebas de campo confirmaron la capacidad del sistema de monitoreo de la salud de la bomba para predecir fallas en la bomba.

Resultados

Tener un modelo gemelo digital de la bomba proporciona varias ventajas

Reducción del tiempo de inactividad del equipo

Cada bomba contiene piezas costosas como válvulas, sellos y émbolos. Puede prevenir fallas al predecirlas con anticipación, lo que, a su vez, ayudará a reducir el tiempo de inactividad.

La gestión del inventario

También es posible que desee identificar las fallas que se desarrollan y obtener información sobre qué piezas pueden necesitar reparación o reemplazo. Hacerlo también lo ayudará a administrar mejor su inventario de piezas.

Gestión de flotas, simulaciones hipotéticas y planificación operativa

En las tres ubicaciones del sitio del pozo, todas las bombas pueden tener una funcionalidad similar. Incluso podrían ser producidos por el mismo fabricante. Pero las diferentes condiciones de funcionamiento (contexto operacional), como la temperatura ambiental, afectarán la eficiencia con la que funcionan estas bombas.

Ahorros de más de \$10 millones proyectados. “En un solo año, Se evitó gastar una cantidad significativa de ingresos en el mantenimiento y reemplazo de los componentes internos de la bomba, como válvulas, asientos de válvulas, émbolos y sellos”, dice Thomas Jaeger, gerente senior de productos de Baker Hughes. “Calculamos que el software que desarrollamos en MATLAB reducirá los costos generales entre un 30 y un 40 %, además de los ahorros que obtendremos al eliminar la necesidad de camiones adicionales en el sitio” (Mathworks, s.f.).

El tiempo de desarrollo se redujo diez veces. “MATLAB nos permitió realizar los análisis y procesamiento deseados, incluido el aprendizaje automático”, dice Singh. “Con un lenguaje de nivel inferior, no siempre puede encontrar las bibliotecas que necesita y completar el proyecto dentro del tiempo asignado de semanas. Si tuviéramos que escribir nuestro propio código usando bibliotecas de lenguaje de nivel inferior para todas las capacidades integradas de MATLAB que necesitábamos, probablemente habría tomado mucho más tiempo completar este proyecto” (Mathworks, s.f.).

Múltiples tipos de datos de fácil acceso. “MATLAB facilitó la combinación de múltiples tipos de datos en una sola aplicación de análisis”, dice Singh. “Incluso pudimos usar datos de sensores de un formato de archivo patentado” (Mathworks, s.f.).

3.5. **FORTALECIMIENTO DE ANÁLISIS USANDO SIMULACIÓN**

La simulación es una técnica de modelado que se utiliza para representar un sistema real y simular su comportamiento bajo diferentes condiciones y escenarios. En el contexto de la gestión de activos, la simulación se puede utilizar para reducir los tiempos de investigación del análisis de causa raíz (RCA) al proporcionar una representación virtual del sistema real y permitir la identificación rápida de las causas fundamentales de los problemas en los activos.

3.5.1 DEFINICIÓN DE RCA

- Según la norma BS EN 62740:2015 titulada Análisis de Causa Raíz

El análisis de causa raíz (RCA) se refiere a cualquier proceso sistemático que identifica factores que contribuyen a un evento particular de interés (evento de enfoque). RCA se realiza tomando como base que los eventos se abordan mediante la comprensión de las causas fundamentales, en lugar de la síntomas inmediatamente evidentes. RCA tiene como objetivo revelar las causas fundamentales para que la probabilidad de que ocurran, o su impacto si ocurren, se pueda gestionar.

Una distinción importante que hace esta norma es el hecho de que RCA se realiza analizando eventos foco que ya ocurrieron, por lo tanto, se analizan eventos pasados (posteriormente a la ocurrencia del evento) el análisis de y el conocimiento de la causa raíz de los eventos pasados puede llevar a acciones que generen mejoras en el futuro.

Esta normativa es una guía de referencia de buenas prácticas para la conducción de un análisis causa raíz, brinda definiciones, pasos fundamentales y enlista herramientas más usadas.

- Según la sociedad americana de calidad

Una causa raíz se define como un factor que provocó una no conformidad y debe eliminarse permanentemente mediante la mejora del proceso. La causa raíz es el problema central, la causa de más alto nivel, que pone en marcha toda la reacción de causa y efecto que, en última instancia, conduce a los problemas.

De forma general sea cual sea la definición todas las Definiciones de RCA están de acuerdo en que este proceso debe ser conducido con la finalidad de encontrar las verdaderas causas de los eventos es de decir la causa raíz, de forma general en regresión se podría decir que en el nivel más alto y complejo y lo más difícil de ver son las Raíces del evento, seguido de otras causas que pueden ser de varios niveles según la complejidad del sistema a analizar y luego la suma de estas causas

se acumula y hacen el evento visible a través de los síntomas, esto se puede esquematizar en el siguiente diagrama:

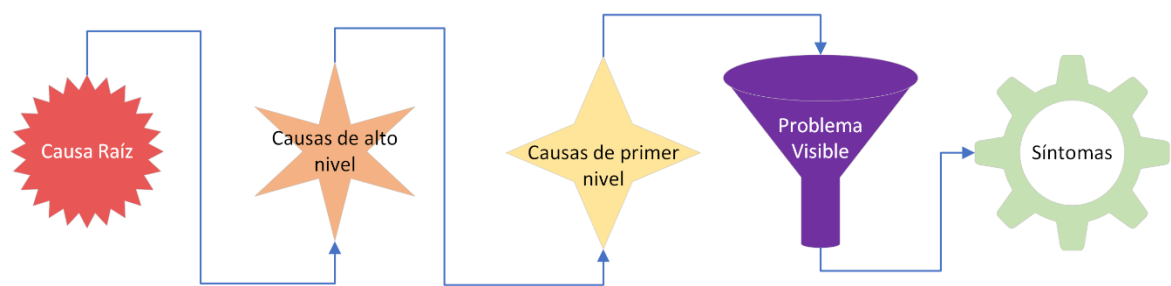


Diagrama 3-6 " Seguimiento de causas que originan un problema "

(Fuente: Elaboración propia en base a investigación)

3.5.2 RCA Y MEJORA CONTINUA

El análisis de la causa raíz se puede rastrear hasta el campo más amplio de la gestión de calidad total (TQM). TQM se ha desarrollado en diferentes direcciones, incluyendo una serie de análisis de problemas, resolución de problemas y análisis de causa raíz.

El análisis de causa raíz es parte de un proceso de resolución de problemas más general y una parte integral de la mejora continua. Debido a esto, el análisis de causa raíz es uno de los componentes básicos de los esfuerzos de mejora continua de una organización. Es importante tener en cuenta que el análisis de causa raíz en sí mismo no producirá ningún resultado; debe formar parte de un esfuerzo mayor de resolución de problemas para mejorar la calidad.

La mayoría de las personas tratan el RCA como si fuera una mejora de procesos. Pero no es así, RCA hace que el proceso (o el producto o el equipo) vuelva a donde estaba antes de que se rompiera, fallase o dejara de cumplir su función. Con la mejora de procesos, simplemente se puede observar el proceso, identificar oportunidades e implementar soluciones y mejoras. Con RCA, se debe realizar una inmersión mucho más profunda en la fase de análisis para descubrir qué cosas específicas realmente causaron la no conformidad o el cambio en el rendimiento.

RCA en términos generales se trata más de ayudar a mantener estable los procesos.

3.5.3 CÓMO CONDUCIR UN ANÁLISIS CAUSA RAÍZ

El RCA es una metodología muy efectiva y se puede usar en varias industrias. Cada industria conducirá el análisis de diferente forma, Según la normativa BS EN 62740:2015 el

proceso de análisis se divide en 5 pasos cuando se investigan problemas relacionados con maquinaria o procesos.

Según lo descrito en la norma los pasos se pueden resumir según la siguiente tabla:

Pasos	Conceptos y tareas para realizar
Iniciación	Con base en el conocimiento disponible sobre el evento de enfoque, determinar la necesidad de llevar a cabo RCA y definir el propósito y el alcance
Establecimiento de los hechos	Recopilación de datos y establecer los hechos de lo que sucedió, dónde, cuándo y por quién
Análisis	Herramientas y técnicas de RCA para determinar cómo y por qué ocurrió el evento de enfoque
Validación	Distinguir y resolver las diferentes posibilidades en cuanto a cómo y por qué se causó el evento de enfoque
Presentación de resultados	Presentar los resultados del análisis de eventos foco

Tabla 3-2 " Pasos de Investigación causa Raíz "

(Fuente: Elaboración propia en base a investigación)

“A modo de resumen, el análisis causa raíz se reduce a tres objetivos principales:

- El primero es justo lo que su nombre indica: descubrir la causa raíz de un problema o evento.
- El segundo objetivo es comprender cómo solucionar, compensar o aprender de los problemas derivados de la causa raíz.
- El tercer y más importante objetivo es aplicar lo que se aprende del análisis para evitar problemas en el futuro para esto es indispensable que los resultados del RCA sean compartidos en todos los niveles de la empresa” (Trout, 2021).

3.5.4 HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ

La mayoría de las herramientas a continuación tienen un solo objetivo es separar los efectos subyacentes de la causa real que provoca la no conformidad.

Existen muchas metodologías, enfoques y técnicas para realizar un análisis de causa raíz, entre las herramientas más comunes se pueden destacar:

Diagramas causa-efecto (espina de pescado): ampliamente utilizado para problemas importantes de un solo evento, como la explosión de una refinería, este proceso utiliza evidencia reunida rápida y metódicamente para establecer una línea de tiempo para las actividades que condujeron al accidente. Una vez que se ha establecido el cronograma, se pueden identificar los factores causales y contribuyentes.

Árbol de fallas: es una herramienta gráfica utilizada para identificar fallas. La técnica se basa en dividir el problema en partes más pequeñas, para poder analizarlas individualmente. La gráfica ayuda a visualizar la estructura del problema y las relaciones entre las diferentes causas. Se utiliza para llegar a la causa subyacente de problemas complejos.

Análisis de cambios: este enfoque es aplicable a situaciones en las que el rendimiento de un sistema ha cambiado significativamente. Explora los cambios realizados en las personas, el equipo, la información y más que pueden haber contribuido al cambio en el desempeño.

Análisis de barreras: esta técnica se enfoca en qué controles existen en el proceso para prevenir o detectar un problema, y cuáles podrían haber fallado.

Supervisión de la gestión y análisis del árbol de riesgos: un aspecto de este enfoque es el uso de un diagrama de árbol para ver qué ocurrió y por qué pudo haber ocurrido.

Resolución de problemas y toma de decisiones de Kepner-Tregoe: este modelo proporciona cuatro fases distintas para resolver problemas:

Análisis de la situación-Análisis del problema-Análisis de solución-Análisis de problemas potenciales

Otras herramientas usadas con frecuencia son:

Gráficos de Pareto, porque, Diagramas de dispersión y análisis de modo y efectos de fallo

A su vez existen algunos softwares comerciales que compilan una serie de herramientas que organiza y automatiza el proceso de análisis de causa raíz, entre los softwares más destacados encontramos

- Metodología RCA Apollo y software RealityCharting
- Metodología RCA PRACT y software EASY RCA

3.5.5 REALIZACIÓN DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ

Al llevar a cabo métodos y procesos de análisis de causa raíz, es importante tener en cuenta:

Si bien una sola persona puede usar muchas herramientas de análisis de causa raíz, el resultado generalmente es mejor cuando un grupo de personas trabaja en conjunto para encontrar las causas del problema. Los responsables finales de eliminar o descartar las hipótesis, la(s) causa(s) raíz identificada(s) deben ser miembros con la Expertiz necesaria para poder descartar causas aplicando herramientas y ensayos disponibles.

Un diseño típico de un análisis de causa raíz en una organización podría seguir estos pasos:

Se toma la decisión de formar un pequeño equipo para realizar el análisis de causa raíz.

Los miembros del equipo se seleccionan del proceso/área comercial de la organización que experimenta el problema. El equipo puede complementarse con:

- Un gerente de línea con autoridad de decisión para implementar soluciones.
- Un cliente interno del proceso con problemas.
- Un experto en mejora de la calidad en el caso de que los otros miembros del equipo tengan poca experiencia con este tipo de trabajo.

El análisis dura unos dos meses (en promedio) se recopila y analiza información de evento. Durante el análisis, se pone el mismo énfasis en definir y comprender el problema, generar ideas sobre sus posibles causas, analizar causas y efectos e idear una solución al problema.

Durante el período de análisis, el equipo se reúne por lo menos semanalmente, a veces dos o tres veces por semana. Las reuniones siempre se mantienen breves, como máximo dos horas, y dado que están destinadas a ser de naturaleza creativa, la agenda es bastante floja.

A una persona del equipo se le asigna la función de asegurarse de que el análisis progrese, o se asignan tareas a varios miembros del equipo.

Una vez que se ha diseñado la solución y se ha tomado la decisión de implementarla, puede tomar desde un día hasta varios meses antes de que se complete el cambio, dependiendo de lo que esté involucrado en el proceso de implementación. El proceso completo de recopilación de información, analizarla y creación de hipótesis, etc., y en especial los tiempos de implementación y validación de soluciones pueden hacer que este proceso pueda durar incluso años.

3.5.6 CUANDO SE DEBE REALIZAR UN ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ

Los criterios para realizar un Análisis de Causa Raíz deben definirse de acuerdo con las necesidades y recursos dentro de su organización. Por ejemplo, los criterios pueden basarse estrictamente en los datos recopilados en Fallos. Por ejemplo, el criterio podría ser que se realice automáticamente un análisis de causa raíz cuando un activo falla más de dos veces en un período

de 12 meses. Los criterios también pueden ser menos restrictivos, lo que permite que un gerente de área o un ingeniero de confiabilidad inicien un análisis de causa raíz, incluso si una falla no cumple con los criterios estándar, también se ha extendido la realización de RCA en equipos con fallos críticos o catastróficos (RCA post mortem) para averiguar el origen de las fallas. Independientemente de los criterios específicos que utilice, su objetivo debe ser definir criterios que permitan al personal saber cuándo se debe realizar siempre un análisis de causa raíz, asegurando que los eventos de falla se analicen de manera consistente y metódica.

3.5.7 ENFOQUES FRENTE A LA OCURRENCIA DE UN EVENTO

De forma general, en la industria la “ocurrencia común es que las compañías tratan los síntomas en lugar de los problemas subyacentes que contribuyen al problema, lo que lleva a la recurrencia continua del problema” (Trout, 2021). Como ejemplo de lo anterior se presenta el siguiente diagrama que explica una aproximación clásica frente a la ocurrencia de un evento de no conformidad.

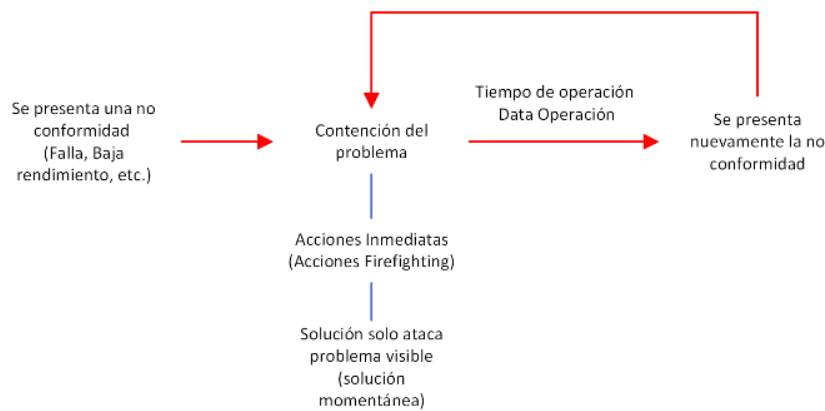


Diagrama 3-7 " Enfoque clásico aproximación a eventos fallo "

(Fuente: Elaboración propia en base a investigación)

Atacar el problema o síntomas visibles genera la reparación del problema con el tiempo. Esto se evita usando una aproximación más ingenieril basada en RCA:

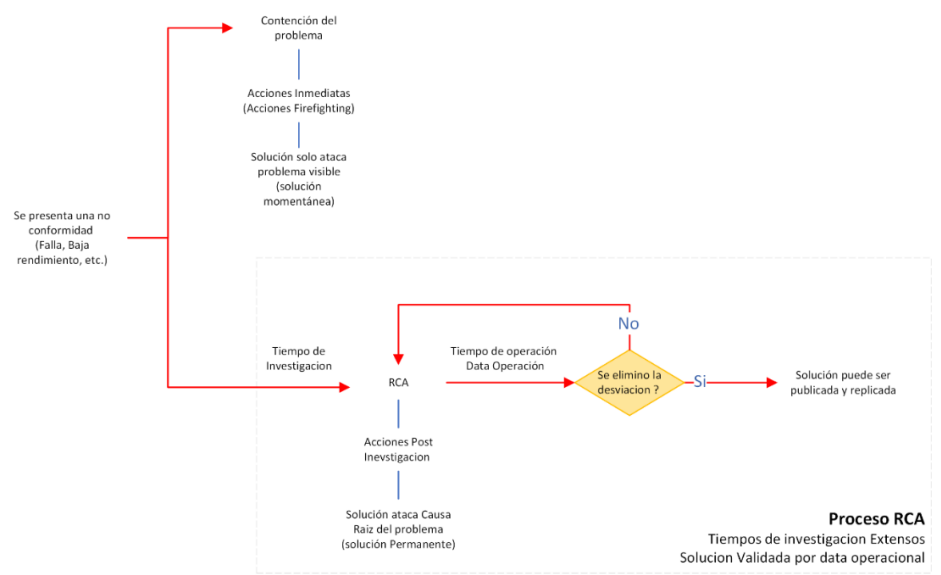


Diagrama 3-8 " Enfoque Ingenieril uso RCA aproximación a eventos fallo "

(Fuente: Elaboración propia en base a investigación)

Como se explicó anteriormente, una de las principales desventajas de esto son los largos tiempos de investigación y posterior validación de las soluciones, dado que está solo se valida con información proveniente del proceso.

3.5.8 FORTALECIMIENTO DE ANÁLISIS CAUSA RAÍZ USANDO SIMULACIÓN

Tomando en cuenta lo anterior, una solución poca explorada es el fortalecimiento del análisis causa raíz usando simulación, esto representado en el siguiente diagrama:

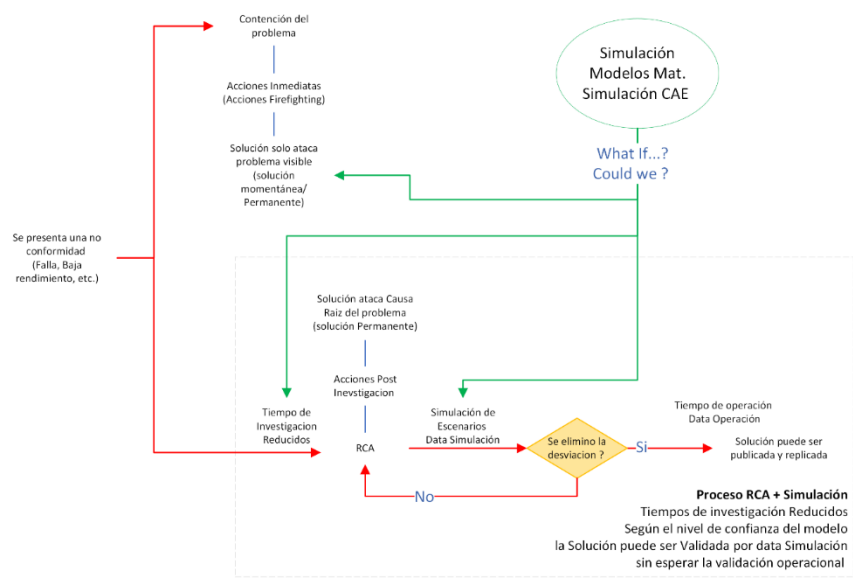


Diagrama 3-9 " Enfoque ingenieril aplicación de RCA potenciado con simulación frente a eventos de fallo"

(Fuente: Elaboración propia en base a investigación)

Como lineamiento general el proceso frente al problema se aborda de igual manera que un proceso RCA convencional, pero esta vez se ocupa simulación para reducir los tiempos del proceso de análisis, suponiendo que hablamos de un sistema integrado de información de operación y mantención tipo APM, la información disponible permite tomar decisiones más certeras y alimentar simulaciones ya sean matemáticas o tipo CAE, esto permite incluso que las acciones de respuesta inmediata puedan llegar a convertirse en acciones permanentes o que duren lo suficiente para lograr que el equipo no vuelva a fallar hasta encontrar la causa raíz del evento, otro de los puntos a destacar que estas simulaciones permiten simular múltiples escenarios lo cual permite reducir el tiempo de investigación, según el nivel de confianza que tenga el modelo (capacidad de que la simulación pueda replicar al modelo físico, error precisión etc.) se puede incluso implementar la solución final sin esperar a que esta sea validada por la data operacional lo que permite una reducción drástica en tiempos de implementación y replicación de las soluciones a lo largo de la empresa.

3.5.9 ANÁLISIS CAUSA RAÍZ Y SISTEMAS APM/DIGITAL TWINS

Las ventajas principales de usar un análisis causa raíz apoyado en un sistema integrado de gestión como un gemelo digital, parte de un APM es la disponibilidad de información, esto agregando las capacidades de simulación, ya sean simulaciones de tipo CAE o simulaciones de modelos de predicción matemática, permite simular diversos escenarios hipotéticos en conjunto con los datos captados en tiempo real, lo cual permite tener un grado de confianza en el modelo mucho mayor a un modelo de simulación clásico que es alimentado de datos de forma manual.

Las investigaciones de Causa raíz usualmente son multidisciplinarias, uno de los principales problemas del método clásico es la disponibilidad de información, usualmente entre departamentos no se comparten toda la información y existe competencia interna entre departamentos, Las fuentes de datos de TI y OT son diversas y están aisladas, lo que da como resultado una visibilidad limitada en toda la empresa, en cambio, la realización de un análisis causa raíz apoyado en un gemelo hace que la disponibilidad de información es para todos iguales esto empodera y reduce drásticamente los tiempos de investigación.

Para hablar de esto tomaremos como ejemplo la implantación de un gemelo digital por General Electric dentro de su APM, en la siguiente ilustración se aprecia un panel de control del apartado RCA

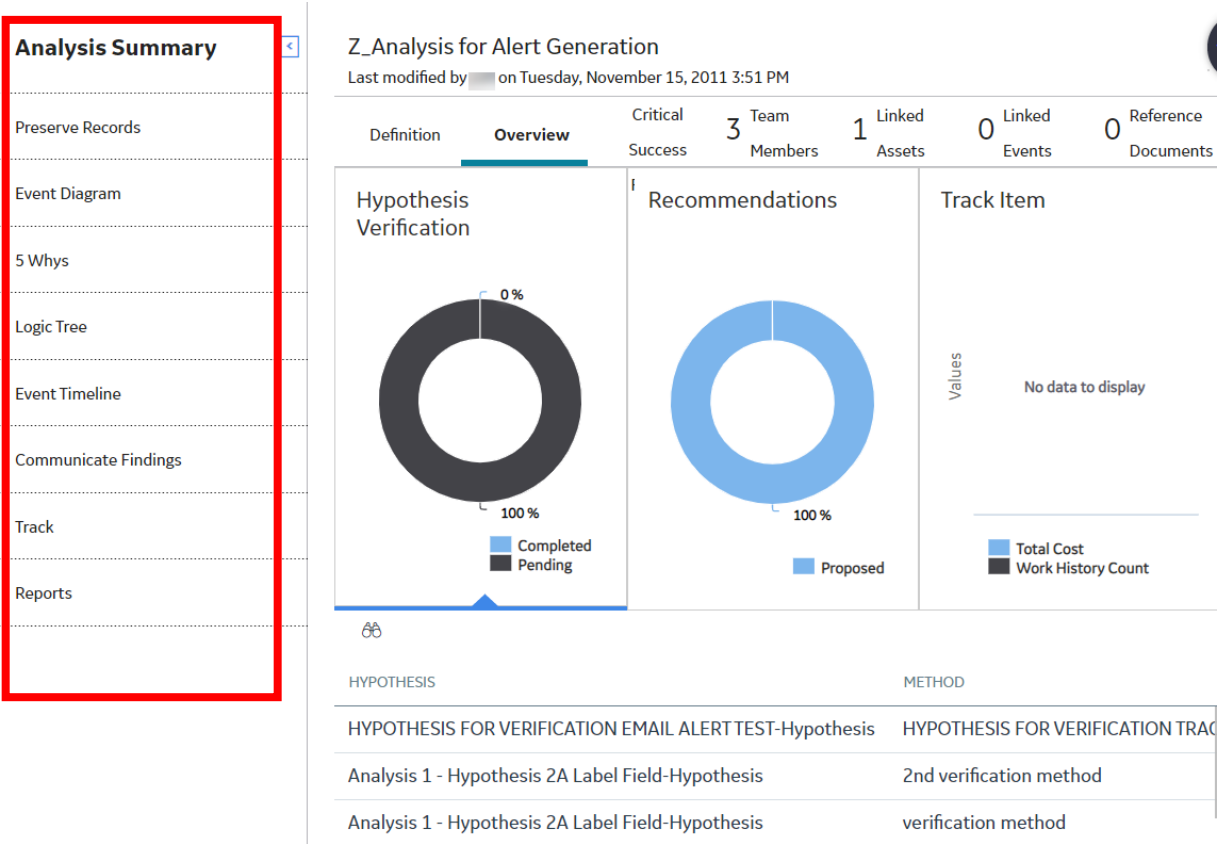


Ilustración 3-11 " Modulo RCA APM "

(Fuente: WEB APM Classic GE Solutions RCA Workflow, General Electric)

El módulo de análisis de causa raíz (RCA) de GE Digital APM permite realizar un análisis de causa raíz, lo que le permite analizar las causas de las fallas. Un análisis de causa raíz también le permite realizar un seguimiento del rendimiento del equipo siguiendo la implementación de las recomendaciones. Cuando crea un análisis de causa raíz, está utilizando las herramientas APM de GE Digital para facilitar un proceso estándar que se basa en la metodología PROACT® for Meridium.

Como se puede apreciar en la ilustración 3-11, el APM integra un módulo de RCA con distintas herramientas, la información representada está alimentada directamente al modelo físico a través de sensores, a su vez se pueden realizar simulaciones y proyecciones tomando también las capacidades de gemelo digital.

Otras ventajas de conducir un análisis RCA que usa estas herramientas son las siguientes:

Conservar registros: contiene una lista de Conservar registros asociados con el análisis seleccionado.

Diagrama de eventos: contiene el Diagrama de eventos asociado con el análisis seleccionado.

Árbol Lógico: Contiene el Árbol Lógico asociado con el análisis seleccionado.

Comunicación de hallazgos: contiene la hoja de datos Detalles del análisis, que incluye la causa principal de la falla del activo. A través de este espacio de trabajo, puede comunicar los hallazgos del equipo y proponer recomendaciones a las personas adecuadas dentro de su organización.

Seguimiento: contiene una lista de elementos de seguimiento que le permiten realizar un seguimiento de la eficacia de sus recomendaciones.

Informes: contiene las secciones Informe principal e Informes individuales, así como informes personalizados, que tienen enlaces para acceder a varios informes para el análisis seleccionado.

Un árbol lógico dentro de una APM está potenciado por los sensores y el flujo de información, lo que permite verificar claramente los equipos con análisis pendientes, la creación de árboles de falla ligados a los equipos de trabajos e indicadores se logra en usando una combinación de sensores que indican parámetros de funcionamiento, en contraste con el historial de funcionamiento previamente establecido, esto generar indicadores de estados anómalos de funcionamiento. Lo que permite generar indicadores de modo de falla que combinan distintos datos de sensores y datos proyectados para generar un árbol de falla más intuitivo con el fin de la identificación de la posible causa raíz. De una manera más precisa.

No todos los modos de falla se pueden resolver mediante data o sensores, por ejemplo, un modo de falla de una bomba que indica la revisión de cableado necesariamente debe realizarse en terreno, esta quedara marcada e identificada en el árbol lógico de falla como roja hasta que sea completada o descartada. De todas maneras, este tipo de softwares entregan información del TAG del equipo y muchas veces información de planimetría, lo que permite identificar la ubicación física y dar la facilidad de identificar la ubicación precisa del componente a revisar dentro del equipo, lo que disminuye el factor de error humano.

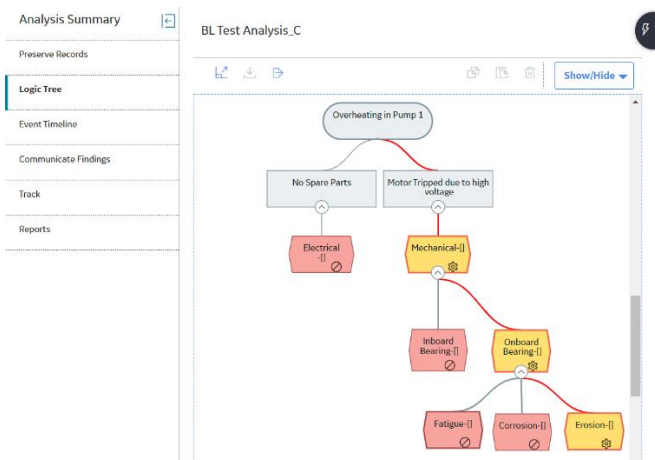


Ilustración 3-12 " Árbol lógico de fallas interactivo APM GE "

(Fuente: WEB APM Classic GE Solutions RCA Workflow, General Electric)

La mayoría de los casos donde la integración del gemelo digital es alta y este tiene capacidades de IA y los resultados de las simulaciones físicas simuladas (cambios de parámetros) se lograron validar con datos reales (modelo integrado que lleva tiempo en operación), se puede lograr bajar el tiempo de investigación drásticamente debido a que las posibles soluciones son validadas a través de simulación y estas se pueden empezar a replicar sin esperar el tiempo de operación que valide su efectividad. De todas formas, el proceso de análisis de causa raíz solo es validado con el tiempo. Si la falla no vuelve a presentarse en un periodo establecido por cada organización, se da por concluida la investigación y la solución puede replicarse en los demás equipos.

Para finalizar, este sistema integrado permite la publicación de resultados más allá de los miembros del grupo de análisis de causas, lo cual permite a todos los involucrados tanto en operación la disponibilidad de data recolectada durante la investigación, ya que esta estará siempre disponible en el historial, lo cual permitirá resolver casos similares más rápidamente.

La ventaja de conducir un análisis de causa raíz (RCA) directamente desde un sistema de gestión del rendimiento de los activos (APM) es que puede ser más rápido, más eficiente y preciso en la identificación de las causas fundamentales de los problemas en los activos.

Al integrar un sistema de RCA en un APM, es posible aprovechar los datos y la información en tiempo real que se recopilan de los activos monitoreados por el APM. Estos datos pueden utilizarse para identificar tendencias, detectar problemas emergentes y hacer un seguimiento del rendimiento general de los activos.

Al utilizar esta información en el proceso de RCA, es posible identificar rápidamente las causas fundamentales de los problemas en los activos y tomar medidas para solucionarlos. También se pueden identificar patrones en los datos que pueden ser utilizados para predecir problemas futuros antes de que ocurran, lo que permite a los equipos de mantenimiento tomar medidas preventivas y minimizar el tiempo de inactividad.

Además, al utilizar un sistema de RCA integrado en un APM, es posible hacer un seguimiento de las acciones correctivas que se han tomado y evaluar su efectividad a lo largo del tiempo. Esto permite a los equipos de mantenimiento y gestión ajustar las estrategias de mantenimiento y mejora continua para maximizar la eficiencia y la eficacia de los activos a lo largo del tiempo.

En resumen, conducir un RCA directamente desde un sistema de APM puede proporcionar una visión más completa y precisa del rendimiento de los activos, lo que permite una solución más rápida y eficiente de los problemas, una mayor eficacia en la gestión del mantenimiento y una mayor eficiencia en el uso de los recursos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el futuro, se espera que los gemelos digitales se conviertan en una herramienta aún más importante en el mantenimiento, gracias a la creciente cantidad de datos recopilados por sensores y dispositivos IoT, Los sensores son cada vez más flexibles y abarcan nuevas métricas, Esto permitirá que los gemelos digitales se actualicen en tiempo real y proporcionen información más precisa sobre el rendimiento y la salud de los equipos, tomando en cuenta un mayor número de variables. Pero no solo se enriquecerá por las nuevas variedades de sensores, sino también al hecho de que es cada vez mayor de poder cognitivo dedicado a su uso. Por lo tanto, los gemelos digitales están constantemente aprendiendo nuevas habilidades y capacidades, lo que significa que pueden continuar generando la información necesaria para mejorar los productos y tornar los procesos y el mantenimiento más eficientes.

Actualmente, Los sistemas integrados de gestión como un APM en conjunto con un gemelo digital ofrecen una forma más sofisticada de evaluación dinámica del riesgo de fallos. Producto de la digitalización, hay más información sobre operación y condición de los activos. Vincular esta información a una medida razonable de riesgo de fallo, del activo, se vuelve fundamental para el proceso de toma de decisiones en todo ámbito de la empresa, pero con un principal impacto en mantenimiento y operaciones.

Los sistemas de gestión APM ofrecen hoy beneficios comprobables en la industria GE presenta una de las soluciones más usadas de este tipo y según datos recopilados por International Data Corporation (IDC) uno de los principales proveedores de servicios de asesorías tecnológicas de inteligencia de mercado, El APM de GE ofrece reducción de costos de inventario entre un 10 y un 40%, incrementos de disponibilidad entre un 2 y un 6%, reducción de mantenimientos reactivos entre un 10 y un 40% entre otros beneficios (Ver anexo 1) según datos de General electric del año 2020 el retorno a la inversión en esta tecnología es de 3,41 meses esto debido principalmente a la gran reducción de mantenimiento reactivos que son entre 2 a 5 veces más costosos que los mantenimientos planeados. Un caso para destacar es el de SABIC Clasificado entre los mayores fabricantes de productos petroquímicos del mundo (Anexo 2) al implementar APM logro una mejora de MTBF (KPI de la empresa) Los estudios revelaron que GE Digital APM extendió el MTBF para tuberías de aceite de 172 días a 2.125 días, reflejando una mejora del 1.135%. Los estudios también han demostrado disminuciones en las fugas y el número de fracasos.

El gran poder la información se ve reflejado en la creciente tendencia en la industria que se enfocan en la toma de decisiones basada datos operativos versus el enfoque clásico de decisiones basadas en Expertiz de un grupo de expertos, por ejemplo la empresa Airbus al implementar un

sistema de APM basado en IBM máximo cambio su estrategia de toma de decisiones de un 20% datos y 80% Expertiz a una de 80% Datos y 20% Expertiz esto debido a la gran capacidad de proyectar escenarios futuros (Anexo 3).

Como recomendaciones finales Es importante mantener flexibles las políticas de mantenimiento con un enfoque en mejora continua para poder lograr el máximo aprovechamiento de las nuevas tecnologías con el fin de maximizar el valor de los activos

A su vez, es necesario realizar una revisión de los perfiles profesionales actuales para darle énfasis en la interpretación y limpieza de datos, data análisis, IoT y ML, tecnologías que son parte integral de esta y la próxima revolución industrial.

BIBLIOGRAFÍA

- Autodesk, S. L. (s.f.). *Uso de Autodesk Forge para la transformación digital en Arquitectura y Construcción*. Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de Autodesk.com: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/es/class/Uso-de-Forge-para-la-transformacion-digital-en-arquitectura-y-construccion-2021#downloads>
- AWS, A. (s.f.). *¿Qué es la tecnología de gemelos digitales?* Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de aws.amazon.com: <https://aws.amazon.com/es/what-is/digital-twin/>
- Editeca. (s.f.). *Gemelo Digital: Construcciones del futuro y la metodología BIM*. Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de editeca.com/: <https://editeca.com/gemelo-digital-construcciones-del-futuro-metodologia-bim/>
- Evtech. (09 de Mayo de 2019). *Conoce Usted la norma ISO 17359*. Obtenido de evtech.cl: <https://evtech.cl/conoce-usted-la-norma-iso-17359/#:~:text=La%20norma%20ISO%2017359%20dicta,aplica%20para%20todas%20las%20m%C3%A1quinas.>
- Fractal, E. (03 de Julio de 2018). *Importancia de la Norma ISO 55.000 en el mundo del mantenimiento*. Obtenido de fractal.com: <https://www.fractal.com/es/blog/importancia-norma-iso-55000-en-mantenimiento>
- Gartner. (s.f.). *Hype Cycle*. Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de <https://www.gartner.es:https://www.gartner.es/es/metodologias/hype-cycle>
- Iberdrola. (s.f.). *INTERNET INDUSTRIAL DE LAS COSAS (IIOT)*. Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de iberdrola.com: <https://www.iberdrola.com/innovacion/que-es-iiot>
- IBM. (s.f.). *¿Cómo funciona un gemelo digital?* Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de ibm.com: <https://www.ibm.com/cl-es/topics/what-is-a-digital-twin>
- IBM. (s.f.). *¿Qué es EAM?* Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de ibm.com: <https://www.ibm.com/ar-es/topics/enterprise-asset-management>
- InfoPLC. (14 de Julio de 2020). *Nace el Digital Twin Consortium*. Obtenido de Infoplcn.net: <https://xfmgran.infoplcn.net/plus-plus/tecnologia/item/108157-nace-el-digital-twin-consortium>
- ISO, C. (s.f.). *ISO/TC 251 Asset management*. Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de [committee.iso.org:https://committee.iso.org/sites/tc251/social-links/resources/espanol.html](https://committee.iso.org/sites/tc251/social-links/resources/espanol.html)

- Markets&markets. (s.f.). *Digital Twin Market worth \$73.5 billion by 2027*. Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de [marketsandmarkets.com: https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/digital-twin.asp](https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/digital-twin.asp)
- Mathworks. (s.f.). *Baker Hughes Develops Predictive Maintenance Software for Gas and Oil Extraction Equipment Using Data Analytics and Machine Learning*. Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de [mathworks.com: https://la.mathworks.com/company/user_stories/baker-hughes-develops-predictive-maintenance-software-for-gas-and-oil-extraction-equipment-using-data-analytics-and-machine-learning.html](https://la.mathworks.com/company/user_stories/baker-hughes-develops-predictive-maintenance-software-for-gas-and-oil-extraction-equipment-using-data-analytics-and-machine-learning.html)
- microsoft. (08 de Noviembre de 2022). *FMI y FMU en un resumen*. Obtenido de [learn.microsoft.com: https://learn.microsoft.com/es-es/bonsai/concepts/fmu/](https://learn.microsoft.com/es-es/bonsai/concepts/fmu/)
- NexusIntegra. (s.f.). *Gestión de Rendimiento de Activos (APM) en la Industria*. Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de [nexusintegra.io: https://nexusintegra.io/es/gestion-rendimiento-activos-apm-industria/](https://nexusintegra.io/es/gestion-rendimiento-activos-apm-industria/)
- NSF. (s.f.). *Cyber-Physical Systems (CPS)*. Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de <https://beta.nsf.gov/funding/opportunities/cyber-physical-systems-cps: https://search.nsf.gov/search?query=cps&affiliate=nsf&search=>
- Solex. (s.f.). *Coexistencia de un ERP con los EAM, gestión de activos empresariales*. Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de [solex.biz: https://www.solex.biz/noticias/coexistencia-erp-eam-gestion-de-activos-empresariales/](https://www.solex.biz/noticias/coexistencia-erp-eam-gestion-de-activos-empresariales/)
- Toro, R. (13 de Julio de 2020). *¿Qué es el mantenimiento preventivo?* Obtenido de [fracttal.com: https://www.fracttal.com/es/mantenipedia/mantenimiento-preventivo](https://www.fracttal.com/es/mantenipedia/mantenimiento-preventivo)
- Toyos, S. (16 de Noviembre de 2022). *Introducción a la gestión del rendimiento de los activos (APM)*. Obtenido de [fracttal.com: https://www.fracttal.com/es/blog/gestion-del-rendimiento-de-los-activos](https://www.fracttal.com/es/blog/gestion-del-rendimiento-de-los-activos)
- Trout, J. (25 de Septiembre de 2021). *RCA - El análisis causa raíz*. Obtenido de [mantenimientoelectrico.com: https://www.mantenimientoelectrico.com/rca/rca-el-analisis-causa-raiz-n1665](https://www.mantenimientoelectrico.com/rca/rca-el-analisis-causa-raiz-n1665)

ANEXOS

Essential Guidance

The oil and gas industry is beginning to embrace an increasingly digitized future. Technology adoption in the industry is increasing efficiency, delivering cost savings, enhancing performance, and improving the protection of assets. The GE Digital APM suite of software and solutions is one such technology that delivers significant value to oil and gas companies. GE Digital APM provides holistic and real-time views on the performance of critical assets, systems, and people. By doing so, the solution enhances performance, increases efficiency, and lowers costs by anticipating potential failures and recommending mitigation measures.

As previously highlighted, the GE Digital APM suite is an integrated offering of five separate solutions that meet different organizational needs (APM Health, APM Reliability, APM Strategy, APM Integrity, and APM Safety). The GE Digital APM solution suite is a proven offering that provides end-to-end improvements across various industry verticals, resulting in millions of dollars of savings.

FIGURE 5 - GE Digital Asset Performance Management – The Benefits



Source: GE Digital

Companies in the oil and gas sector that are adopting the GE suite will reap positive benefits in the years to come. Those companies that are prevented from adopting the technology will fall further behind the industry's leaders.

The use of APM and digital twin solutions requires a holistic and organization-wide transformational approach. When embarking on an APM and digital twin solutions adoption journey, executives need to:

- Plan the Adoption Journey**
Planning is critical to the building of a transformation road map that outlines the adoption of APM solutions. As such, business leaders will need to evaluate the current level of technology maturity within their organizations; they should also define their asset strategies and RCM policies. In addition, leaders need to identify opportunities to improve asset performance, eliminate siloed operations, and enhance skills development. Furthermore, leaders should develop a deployment matrix that defines various stages of solution deployment and highlights planned outcomes/expectations of each stage (by comparing them with the current state of deployment).
- Transform the Organization**
One critical early stage in the effective deployment of an APM solution is ensuring a culture of technology adoption is present within the organization. Such a culture can be instilled by training employees on the technology solutions that are to be deployed. Business-critical assets need to be identified, and associated risk and mitigation plans need to be developed in advance. Digital twin solutions require the identification of critical assets and continuous monitoring in order to drive value; therefore, putting in place operational policies is an essential undertaking. Asset strategies — which encompass all business assets— need to be developed, optimized, and continuously improved based on emerging threats.
- Ensure Data Transparency and Flow**
An APM and digital twin solution is holistic in nature and deployed across the organization. Such solutions cut through various functions and rely on the operational data that serves as a backbone for data analytics. Effective data governance models thus need to be adopted to enable the flow of the data across the organization. Two critical impacts of an APM solution are bringing together IT and operations and breaking down silos. Without such silo breakdowns, oil and gas companies will continue to build out ad hoc and fractured capabilities that do not capitalize on the advantages offered by advanced technology solutions.
- Drive Business Objectives Through APM and Digital Twin Solutions**
Executives should define the reasons for an APM solution deployment and align them with their business objectives. These objectives could be to drive production, control capex/opex, or minimize operational risk. An APM program can create value for a business by using key metrics and indicators to measure the effectiveness of asset strategies, evaluate asset performance, and identify emerging threats across the organization.

(Fuente: Whitepaper <http://gpc-whitepapers.com/register.aspx?r=apm-and-digital-twin-solutions-to-play-a-pivotal-role-in-the-future-of-the-oil-and-gas-sector>)

Case Study
SABIC on a Path to Manufacturing Excellence

SABIC – A Leading Chemicals Company

Saudi Basic Industries Corporation (SABIC) is one of the world’s leading chemicals companies. SABIC has more than 40,000 employees spread across 50 countries. The company produces a range of products, including chemicals, high-performance plastics, agri-nutrients, and metals. SABIC has about 70 plants in Saudi Arabia, Europe, the Americas, and Asia and launches over 150 new products each year.

SABIC is composed of four strategic business units: Petrochemicals, Specialties, Agri-Nutrients, and Metals. Chemical products are supplied to the agricultural, automobile, building and manufacturing, processing, food, and transport industries. The company has experienced organic and inorganic growth for the last 40 years. The company produced 72.6 million metric tons of products in 2019 and maintained more than \$90 billion in total assets.

Business Need

SABIC executives believe that the company must adapt itself to this ever-changing world and sustain the growth it has enjoyed over the past 40 years. Advanced technological solutions should enable the company to remain an industry leader going forward. Engineers in SABIC have indicated that production processes, assets, workers, safety standards, regulatory compliance policies, operational costs, and data across the organization are highly interdependent. To resolve this problem, SABIC decided to deploy an APM solution to meet its long-term strategic goals and support its asset strategies.

The Solution - GE Digital APM

SABIC adopted an innovative multi-stage strategy as part of its GE Digital APM implementation process. The first stage focused on adopting a transformational attitude and readying the organization culture for the APM solution deployment. As part of this process, more than 20,000 employees from various functions were trained on the GE Digital APM solution concept.

The second stage of SABIC’s GE Digital APM implementation plan focused on production loss accounting (PLA). The PLA process aimed to standardize asset health measurements, evaluate the performance KPIs for assets, and create methods for inspecting and monitoring assets (based on generated data). Classification of various failure triggers, benchmarking of asset performance, and development of various policies and procedures to mitigate failures were part of the PLA process.

Prior to implementing the GE Digital APM solution, SABIC needed to carefully evaluate all asset resources and determine the impact of those resources on its operations. SABIC also needed to identify critical and non-critical assets prior to solution implementation. The company thus carried out 100 different operational and reliability instrumentation system studies to gauge the safety of critical functions.

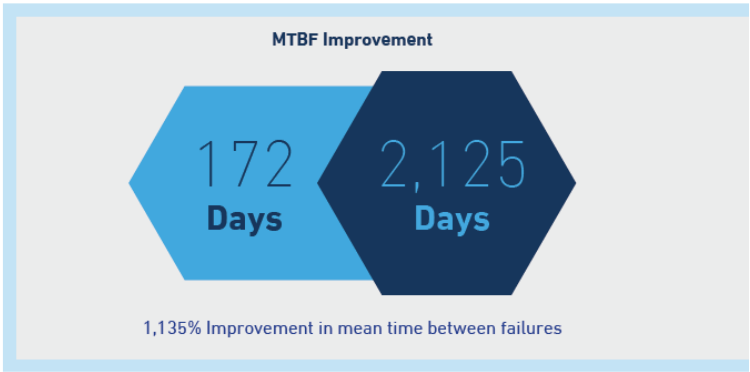
Risk-based inspection studies were another critical stage in the implementation process. The objective of these risk assessments was to ensure that operational risk was adequately managed and kept low. Operational failures in the oil and gas industry can lead to significant downtimes, cause human fatalities, and result in the loss of millions of dollars. RCM studies were also carried out for all critical systems and some non-critical systems. The objective of the RCM studies was to ensure maintenance tasks were performed in an efficient, cost-effective, reliable, and safe manner. Such maintenance tasks may be preventive or predictive; they may also involve non-destructive inspections to identify or monitor flaws.

A root cause analysis (RCA) was carried out at the last stage of the deployment process. This analysis was a systemic, evidence-driven process that sought to identify the causes of various incidents and the corrective measures that could be undertaken to resolve failures. The SABIC team carried out RCA on production incidents (stoppage/slowness), health, safety, and security incidents, asset failures (sporadic/chronic), product quality, and customer complaints.

Benefits Achieved

SABIC measured the impact of the APM solution by analyzing the change in MTBF (the organization used MTBF as a KPI). Studies revealed that GE Digital APM extended MTBF for oil pipes from 172 days to 2,125 days, reflecting an improvement of 1,135%. Studies have also shown decreases in leakages and the number of failures.

FIGURE 4 - GE Digital APM driving value for SABIC



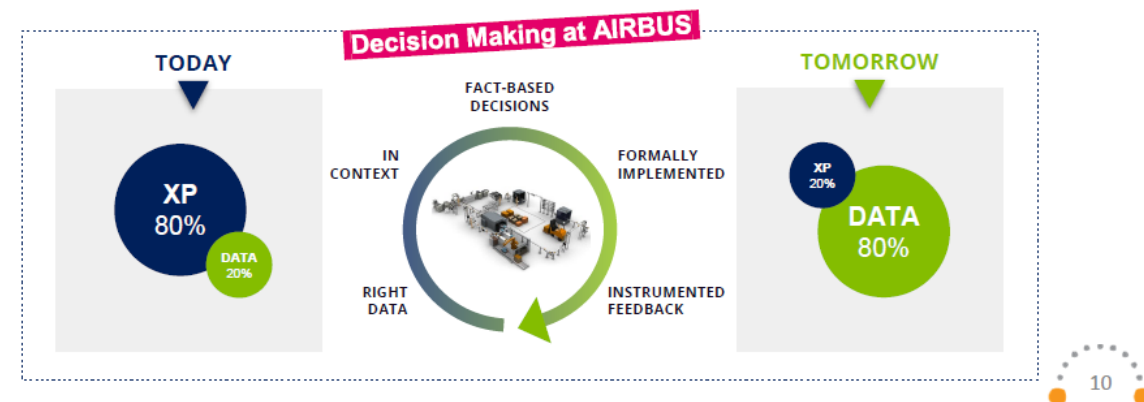
Source: GE Digital

SABIC understands that a reliability-oriented culture needs to be nurtured in the organization. Accordingly, SABIC is continuously training its employees through various initiatives.

Major challenges of Asset Management **AIRBUS**

Complex and incomplete processes, methods & tools that prevent efficient and aligned decision-making

The current situation (pandemics, wars, etc.) makes the transition to **industrial asset management** even more obvious and urgent, especially when it comes to **optimizing our spends**, handling our **risks** and shaping our future industrial systems for **greater performance & resilience**
 #sustainability



ANEXO 3 AIRBUS Cambios en la toma de decisiones al implementar APM

(Fuente: Webinar Optimizing Asset management performance with Simulation Digital Twins Cosmotech y Airbus)

Disponible en https://www.brighttalk.com/webcast/18347/560458?utm_campaign=communication_reminder_starting_now_registrants&utm_medium=email&utm_source=brighttalk-transact&player-preauth=roPbKKx5q7KAt%2BNzccxEpHJePLY046mW0TVBjeixBo0%3D