

Capítulo 6

Gemelos digitales y toma de decisiones inteligente

Jack C Chaplin, Giovanna Martinez-Arellano y Andrea Mazzoleni

6.1 Implantación

Gemelo (sustantivo): algo que contiene o consiste en dos partes coincidentes o correspondientes.

- Oxford University Press

En el capítulo 5 se analizaron formas de simular y modelar sistemas de fabricación de forma offline (sin conexión). Sin conexión en este contexto significa que la simulación se está ejecutando desconectada del sistema real y depende del usuario para actualizar los parámetros y datos para mantener la precisión del modelo. Por el contrario, este capítulo detalla las simulaciones en línea, donde el modelo se conecta directamente al sistema físico y se actualiza automáticamente a medida que el sistema cambia. Este enfoque es común llamado *gemelo digital* (*digital twin en inglés*). Además, este capítulo discutirá los sistemas de apoyo a la toma de decisiones, que son paquetes de software destinados a mejorar el proceso de toma de decisiones discutido en el Capítulo 4, y para resolver problemas complejos.

Un gemelo digital es una réplica simulada de un sistema complejo. A diferencia de la simulación más convencional, el gemelo digital está conectado en tiempo real

J.C. Chaplin (✉), G. Martinez-Arellano

Instituto de Fabricación Avanzada, Universidad de Nottingham, Nottingham, Reino Unido
correo electrónico: jack.chaplin@nottingham.ac.uk, giovanna.martinez@nottingham.ac.uk

A. Mazzoleni

AFIL – Associazione Fabbrica Intelligente, Milán, Italia
correo electrónico: andrea.mazzoleni@afil.it

© Los Autores 2020

J.C. Chaplin et al. (eds), *Fabricación digital para pymes*

al equivalente físico y recopila los datos generados. Esto permite que el gemelo digital mejore su precisión en función del sistema real, y que el gemelo digital analice el sistema o realice pruebas que serían demasiado costosas o requerirían mucho tiempo para ejecutarse en la cosa real. Los gemelos digitales se utilizan para modelar sistemas complejos y tienen su origen en el modelado de aire y naves espaciales.

La primera definición de gemelo digital (entonces solo un concepto sin nombre) fue acuñada por Michael Grieves en 2002 [1] como un concepto para la gestión del ciclo de vida del producto. Después de muchos nombres diferentes, incluidos Mirrored-Spaces Model, Information Mirroring Model y Virtual Twin, el nombre ahora establecido "gemelo digital" fue introducido posteriormente por John Vickers en un informe de la NASA publicado en 2010 [2] y se ha convertido en la terminología estándar. Una revisión de la literatura publicada entre 2012 y 2016 por Negri y sus colegas [3] como parte del proyecto MAYA encontró 16 definiciones diferentes para gemelos digitales en cuatro campos de investigación: aeronáutica y espacial, robótica, fabricación e informática. Algunas de las definiciones propuestas se pueden encontrar en Tabla 6.1-1.

Año	Definición
2010	Una simulación multi-física integrada, multi-escala, probabilística 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. El gemelo digital es ultra-realista y puede considerar uno o más sistemas de vehículos importantes e interdependientes [4].
2012	Modelo ultra-realista de computadora, de inicio a fin, de una estructura de aeronave que se utiliza para evaluar la capacidad de la aeronave para cumplir con los requisitos de la misión [5].
2015	Modelos muy realistas del estado actual del proceso y su comportamiento en la interacción con el entorno en el mundo real [6].
2016	La simulación del propio objeto físico para predecir los estados futuros del sistema [7].
2018	Los gemelos digitales son representaciones digitales realistas de las cosas físicas [8].

Tabla 6.1 -1 Definiciones de gemelos digitales en orden cronológico.

Grieves describió el modelo gemelo digital en su forma más básica con el diagrama visto en Figura 6.1-1. Un gemelo digital siempre corresponde a un *gemelo físico*: la posición física real del producto que se está simulando con el gemelo digital.

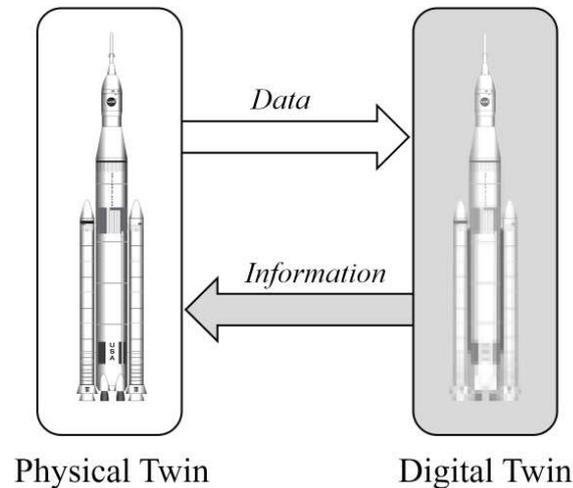


Figura 6.1-1 El gemelo digital es la contraparte virtual del gemelo físico y se utiliza para comprender mejor los sistemas complejos, como las líneas de fabricación o los cohetes. Los datos recopilados con sensores en el gemelo físico informan al gemelo digital y mejoran la precisión, y la información obtenida mediante el análisis del gemelo digital se puede utilizar para controlar el gemelo físico. Derechos de la imagen del autor. Adaptado de [1].

El gemelo físico y el gemelo digital están conectados. Esto es lo que distingue a un gemelo digital de una simulación más convencional. Los datos se recogen del gemelo físico en tiempo real con sensores y se utilizan para mejorar y optimizar el gemelo digital. El gemelo digital puede ejecutar métodos de análisis, y múltiples escenarios posibles se pueden probar digitalmente. La información procesada obtenida de estos puede devolverse al gemelo físico para optimizar el rendimiento del mundo real.

Los sistemas simples se pueden simular con un nivel de detalle suficiente para que no se requiera la complejidad adicional de una conexión en tiempo real. Los gemelos digitales suelen reservarse para sistemas complejos donde no es posible crear una simulación adecuada fuera de línea, y la simulación debe mejorarse con el tiempo.

“Los aviones, los cohetes, el equipo de fabricación de piso e incluso los automóviles tienen o tendrán [instancias gemelas digitales]. Los clips de papel no”.

- Michael Grieves

El factor clave diferenciador entre un modelo convencional y un gemelo digital es que el sistema físico está alimentando datos en tiempo real en el gemelo digital para actualizar el modelo. Aunque los cambios estructurales significativos en el

sistema físico pueden requerir intervención manual, datos como el rendimiento de fabricación, tamaños de búfer, tiempos de arriba / abajo, etc. se puede recoger y utilizar automáticamente para mantener el gemelo digital actualizado. Las simulaciones que se ejecutan en el modelo del gemelo digital utilizan la información más reciente y precisa.

Antes de discutir más a fondo los gemelos digitales, es importante comprender cómo es posible conectar una simulación de gemelos digitales al gemelo físico, el aspecto en línea que diferencia el enfoque de los enfoques fuera de línea en el Capítulo 5. Esto se logra utilizando sensores para monitorear el gemelo físico, e informar de su estado, y la sección 6.2 introducirá sensores y el desarrollo moderno de sensores inteligentes.

6.2 Sensor

6.2.1 Introducción a los sensores

La industria manufacturera debe lograr un crecimiento sostenible y un aumento de la productividad para seguir siendo competitiva en el escenario global. Cada vez más, el acceso y la explotación de los datos de fabricación están contribuyendo a estos objetivos, permitiendo una toma de decisiones más rápida y eficaz.

Una de las tecnologías clave para la explotación de datos es la *Internet de las cosas* (IoT), que integra sensores y equipos de comunicación en maquinarias y líneas de fabricación, recopilando y transmitiendo datos a la red de la empresa de fabricación. La aplicación de estas técnicas a la fabricación también se denomina a veces Internet Industrial de las Cosas (IIoT).

IoT es un desarrollo reciente y es un término amplio para un conjunto de tecnologías, sistemas y principios de diseño asociados con el uso de cosas conectadas a Internet -que monitorean y manipulan el entorno físico. IoT conecta sensores y actuadores a sistemas de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) a través de redes cableadas o inalámbricas. La tecnología más importante a nivel de dispositivo o hardware en esta infraestructura de red es la tecnología de *sensores*, ya que es el medio más básico para recopilar y controlar datos en tiempo real.

Un sensor es un dispositivo que observa y mide una propiedad física de un fenómeno natural o proceso hecho por el hombre, y convierte esa medición en una señal. Esa señal puede ser reportada a un trabajador, utilizada para activar un actuador o recogida para su análisis. Los sensores han desempeñado un papel en la fabricación desde su invención. Proporcionan un medio para recopilar información sobre las operaciones y procesos de fabricación a medida que se realizan. Por lo general, esto significa alguna propiedad del proceso (temperatura, velocidad, ubicación, etc.) se convierte en una señal eléctrica y se recoge por el controlador de proceso, a menudo un controlador lógico programable (PLC). El controlador puede usar la lectura del sensor para modificar el proceso, o la señal puede simplemente registrarse para una inspección posterior.

Los *datos de proceso* son registros del procesamiento realizado para crear productos, incluidos detalles como el programa realizado (para una máquina CNC), los parámetros de proceso establecidos por el usuario y los datos registrados de sensores como la vibración, la temperatura o la fuerza de corte (dependiendo del proceso). La correlación con el ID de producto individual permite analizar estos datos en relación con los resultados de calidad o la vida útil del producto específico. La mayoría de los sensores tradicionales convierten su propiedad medida en electricidad y, por lo tanto, requieren un cable o cable para conectarse con los instrumentos externos que registran este valor. El cable puede ser de alambre de cobre, par trenzado o fibra óptica.

Los datos de los sensores deben enviarse de alguna manera a una computadora para su interpretación o almacenamiento. A menudo, este será un PLC local o un dispositivo de captura de datos en el que los datos del sensor pueden actuar inmediatamente. Puede ser un servidor remoto donde los datos se pueden registrar en una base de datos o una hoja de cálculo simple. *Fieldbus* es el término utilizado para redes informáticas industriales. Existen muchos estándares que incluyen Ethernet, Ethernet industrial, red de área de controlador (CAN), bus de campo de proceso (Profibus) y una amplia variedad de tecnologías específicas del proveedor. El uso de estos dependerá de la compatibilidad del equipo y de los requisitos para el control del proceso.

Los sensores inalámbricos ofrecen flexibilidad de instalación, lo que mejora la supervisión y el control del proceso y, al mismo tiempo, ofrece costos de instalación y mantenimiento reducidos. Las aplicaciones industriales ofrecen un amplio margen para el crecimiento en el uso de sensores inalámbricos, pero este crecimiento no se puede lograr sin superar algunos de los desafíos clave que enfrenta el mercado:

- *Estándares en evolución:* Las nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica todavía están bajo investigación y desarrollo. Algunos de estos estándares pueden no ser compatibles con otros, lo que limita la interoperabilidad de la red.
- *Tamaño de red:* el escenario de aplicación o caso de uso determinará el tamaño de la red. Algunos enfoques inalámbricos son mejores para escalas de implementación más pequeñas o más grandes, y si la aplicación exige un cambio en la ubicación, el número de nodos o ajustes en la topología, es posible que deba cambiarse el enfoque.
- *Bandas de frecuencia inalámbricas abiertas:* Con la propagación de tecnologías inalámbricas como teléfonos móviles y Wi-Fi, hay una falta de bandas de frecuencia abiertas. Actualmente, la mayoría de los dispositivos de red de sensores inalámbricos operan en bandas sin licencia, como 915 MHz y 2,4 GHz, y la comunicación confiable puede verse afectada por la interferencia de otros dispositivos que operan en la misma banda de frecuencia.
- *Seguridad industrial:* Hacer un sistema de sensores inalámbricos a prueba de fallos depende en gran medida del tipo de aplicación en la que se utiliza el sensor inalámbrico.

Además de estas redes, existen muchos *protocolos de comunicación de máquina a máquina* de nivel superior para intercambiar datos de proceso (en lugar de datos de control) en entornos de automatización industrial. Estos incluyen comunicaciones de plataforma abierta: arquitectura unificada (OPC UA), MTConnect, servicios de distribución de datos (DDS) y transporte de telemetría MQ (MQTT). Los estándares simplificarán significativamente la adquisición de datos de proceso al manejar muchos aspectos de redes y proporcionar un estándar común para los datos.

6.2.2 Tipos de sensores

Los sensores convierten los fenómenos físicos en señales, y son un ejemplo de una fuente de datos primaria (ver sección 5.2.2). Casi cualquier fenómeno físico se puede medir con un sensor, pero los tipos más comunes utilizados se enumeran a continuación.

- *Temperatura*: Este sensor proporciona mediciones de temperatura como una señal eléctrica (por ejemplo, voltaje) proporcional a la medición de temperatura. Hay varios sensores de temperatura eléctricos como el termistor, termopar, termómetro de resistencia y el sensor de temperatura de separación de banda de silicio, y cada uno tiene diferentes propiedades que los hacen mejores o peores para ciertas situaciones.
- *Fuerza, presión*: Hay dispositivos que convierten las variaciones en la fuerza o presión aplicada en una señal eléctrica. Hay dos principios que se han vuelto dominantes en la medición de la fuerza: sensores basados en medidores de tensión y sensores de fuerza piezoeléctricos. Los sensores del calibrador de tensión contienen una lámina eléctricamente conductora que se deforma a medida que se aplica la fuerza. Esta deformación cambia la resistencia eléctrica del resorte, y esta propiedad se convierte en una señal eléctrica. Los sensores piezoeléctricos contienen dos discos de cristal con una lámina de electrodo montada en el medio. Al aplicar fuerza, esto genera una carga eléctrica que puede amplificarse y usarse como señal. Los sensores piezoeléctricos son la primera opción para mediciones rápidas de fuerzas pequeñas, mientras que los sensores basados en medidores de tensión son superiores cuando se trata de fuerzas más grandes [9].
- *Nivel*: Estos sensores detectan el nivel de líquidos y otros fluidos y sólidos fluidizados como polvos, y son comunes en el control de procesos industriales. Los ejemplos incluyen sensores hidrostáticos (que miden la presión del agua para deducir el nivel del agua) y sensores de nivel óptico que utilizan la atenuación de la luz para medir la profundidad del fluido.
- *Aceleración, vibración*: El movimiento también se puede detectar con sensores. Los acelerómetros miden la aceleración en una sola dirección, y a menudo se combinan en unidades con dos (bi-axial) o tres (tri-axial) acelerómetros en ángulo recto para detectar la dirección de la aceleración. Los acelerómetros

también se pueden usar para detectar vibraciones. Los acelerómetros son a menudo sistemas microelectro-mecánicos (MEMS) que convierte el movimiento de una pequeña masa en una señal eléctrica con cristales piezoeléctricos. Estos cristales generan pequeñas señales eléctricas cuando se someten a esfuerzos mecánicos.

- *Orientación*: Los sensores giroscópicos detectan la rotación alrededor de un solo eje, y al igual que los acelerómetros a menudo se combinan en sensores biaxiales y triaxiales. De hecho, los acelerómetros triaxiales pueden detectar la orientación de un objeto estacionario a medida que detectan la gravedad de la Tierra. Sin embargo, los acelerómetros no pueden hacer esto mientras el objeto se está moviendo. Los acelerómetros triaxiales y los giroscopios triaxiales se pueden combinar en unidades de medición inercial (IMUs). Las IMU se utilizan para determinar la orientación de los teléfonos móviles, el ajuste de la suspensión en los automóviles y el control de las aeronaves.
- *Proximidad*: Los sensores de proximidad detectan si un objeto está físicamente cerca del sensor y detectan efectivamente la presencia o ausencia de objetos. Se pueden implementar con una variedad de tecnologías que incluyen métodos ópticos, inductivos, magnéticos y capacitivos. Son ampliamente utilizados en la automatización industrial como las líneas transportadoras para el conteo y la detección del atasco, y en las máquinas-herramientas para el dispositivo de seguridad y la secuencia.
- *Posición*: Los sensores de posición detectan la posición mecánica de los objetos. A menudo utilizan tecnologías similares a los sensores de proximidad, pero pueden determinar si un objeto está presente, pero también qué tan lejos está el objeto del sensor. Pueden medir la distancia absoluta, la rotación angular y los ángulos de inclinación dependiendo de la tecnología utilizada y la aplicación. Estos se utilizan comúnmente para controlar el movimiento de robots y actuadores, la rotación de las válvulas y los ángulos de los actuadores.
- Otros sensores incluyen *humedad, gas, biosensor, fotoeléctrico, flujo*, y muchos otros, mucho más de lo que se puede describir en este libro.

Una discusión de los sensores con detalles adicionales sobre sus aplicaciones en robótica se puede encontrar en el capítulo 8.

6.2.3 Sensores inteligentes

En esencia, los sensores son a menudo dispositivos mecánicos o electrónicos muy simples para convertir estímulos físicos en señales eléctricas. Sin embargo, el progreso y la miniaturización de la tecnología, combinados con el movimiento hacia la Internet de las cosas, significa que muchos sensores (y un porcentaje particularmente alto de sensores inalámbricos) tienen más características que la simple transducción de señales.

Los *sensores inteligentes* son impulsados por microprocesador e incluyen características como la capacidad de comunicación y el diagnóstico a bordo que

proporcionan información a un sistema de monitoreo y / o al operador para aumentar la eficiencia operativa y reducir los costos de mantenimiento. Pueden realizar algunos cálculos localmente, reduciendo la cantidad de información que debe transmitirse. Esto es particularmente importante para los sensores inalámbricos que tienen menos ancho de banda disponible que los sensores con cable. Las características comunes de los sensores inteligentes incluyen:

- *Acondicionamiento de señal* que preserva la integridad y garantiza el aislamiento en entornos industriales hostiles, suavizando el ruido y amplificando las señales débiles.
- Utilizar la *potencia de cálculo local* para procesar e interpretar datos localmente; tomar decisiones basadas en los parámetros físicos medidos, ajustar los parámetros de forma autónoma y ser selectivo sobre qué datos se transmiten.
- *Diagnósticos integrados* para una solución de problemas y mantenimiento simplificados.
- Cumplir con una *variedad de estándares de comunicación* como Wi-Fi, Bluetooth y Zigbee, en lugar de estar limitado a una sola tecnología.

Los sensores se han utilizado en la fabricación durante décadas, pero los sensores inteligentes ofrecen beneficios nuevos y diversos que potencialmente pueden conducir a una mayor rentabilidad y productividad. Principalmente, los sensores inteligentes ofrecen datos más ricos: el contexto y la relevancia de los datos se registran además de la señal en sí, y los sensores inteligentes pueden ser selectivos sobre los datos que se envían y hacia dónde se envían. Las aplicaciones de sensores inteligentes para la fabricación incluyen:

- *Agregación y recopilación de macrodatos*: la minería de macrodatos y datos utiliza cantidades extremadamente grandes de datos para "minar" para obtener información. Los sensores inteligentes facilitan esto de tres maneras;
 - En primer lugar, los sensores inteligentes a menudo son más fáciles de implementar que los sensores convencionales, ya que incluyen todo el equipo necesario y los protocolos de comunicación inalámbrica para conectarse a los sistemas de ejecución de fabricación existentes en un solo paquete sin tener que ejecutar muchos cables.
 - En segundo lugar, la capacidad de los sensores inteligentes para preprocesar datos les permite agregar grandes cantidades de datos y transmitirlos de manera efectiva. Los macrodatos y la minería de datos normalmente se basan en grandes cantidades de datos para obtener los mejores conocimientos, y es posible que los sensores simples no puedan recopilar y compartir los volúmenes de datos necesarios.
 - En tercer lugar, los sensores inteligentes a menudo pueden comunicarse entre sí, lo que permite que los datos de los sensores se correlacionen entre sí, lo que facilita el análisis de datos de múltiples fuentes.

- *Control de calidad*: La calidad es fundamental para la competitividad de la fabricación, y el control de calidad debe ser un elemento integral del proceso de fabricación. La identificación temprana de problemas reduce o elimina el coste de las piezas desechadas de los costosos retrabajos. Mantener los procesos bajo control requiere monitoreo, y esto se hace tradicionalmente con sensores convencionales para alimentar gráficos de control y métodos estadísticos de control de calidad. Sin embargo, los sensores inteligentes pueden preprocesar datos para detectar anomalías a medida que ocurren y proporcionar alertas y banderas en tiempo real cuando los procesos se desvían de los nominales. Las características adicionales de los sensores inteligentes les permiten enviar información más rica que solo una señal en relación con el parámetro físico y tomar decisiones.
- *Mejora y automatización de la logística y la gestión de activos*: alimentado por baterías y comunicándose de forma inalámbrica, los sensores inteligentes pueden rastrear la ubicación de activos, vehículos, inventario o personas. Los fabricantes pueden utilizar los datos para rastrear la logística y la cadena de suministro, monitorear el movimiento y la utilización de los activos y encontrar piezas y herramientas perdidas.
- *Cumplimiento normativo*: Muchos sectores manufactureros están altamente regulados, con normas estrictas sobre recopilación y almacenamiento de datos para garantizar el cumplimiento. La compilación de los informes necesarios a partir de datos, registros y registros de sensores en múltiples sistemas puede requerir mucho tiempo y mano de obra. Un sistema de gestión de datos bien gestionado combinado con sensores inteligentes puede simplificar drásticamente este proceso, con sensores capaces de recopilar datos ambientales como la temperatura y la humedad, así como datos de utilización de equipos como el consumo de energía, las horas de funcionamiento y la información de mantenimiento.

6.2.4 Seguimiento del producto

La función fundamental de los sensores es detectar fenómenos físicos y convertirlos en señales electrónicas, pero los sensores pueden no ser siempre tan simple como convertir (por ejemplo) una temperatura a un voltaje. Un sensor óptico cuidadosamente configurado puede convertirse en un lector de código de barras, lo que permite una información más rica y compleja sobre el mundo que se recopilará. *El seguimiento de productos* es el uso de sensores para determinar qué elemento específico se encuentra en una ubicación, lo que permite rastrear productos únicos y recopilar más información granular. Esta información podría alimentarse a un gemelo digital, dándole datos en vivo sobre los productos que se producen.

El seguimiento del producto requiere tres características clave para ser implementado:

1. Una forma de identificar de forma única el producto (o parte o activo) que se está rastreando.
2. Una forma de adquirir datos sobre el producto (como datos de medición o datos de proceso) que se pueden correlacionar con su identificador.
3. Una forma de almacenar los datos adquiridos para referencia futura.

No hay ningún requisito inherente para que ninguna de estas tres características se automatice. El identificador podría ser un número escrito en la pieza con un rotulador, la adquisición de datos podría ser parámetros de proceso anotados en una hoja de papel, y los datos podrían almacenarse en una carpeta de plástico para su posterior referencia. Esto puede parecer un ejemplo exagerado, pero este enfoque sigue siendo extremadamente común en las empresas de fabricación modernas, tanto grandes como pequeñas. Las tarjetas de trabajo manuscritas siguen siendo el estándar más común utilizado y pueden funcionar de manera extremadamente efectiva. Sin embargo, cada instancia de entrada manual de datos aumenta las posibilidades de que se cometa un error. La entrada manual de datos también representa a un trabajador calificado que realiza un trabajo poco calificado, y su tiempo a menudo podría gastarse mejor.

Las tecnologías automatizadas de seguimiento de productos pueden encajar en cada una de estas tres categorías. Permiten la identificación, adquisición y almacenamiento de datos con menos esfuerzo del trabajador o ningún esfuerzo. También reducen significativamente la probabilidad de error y facilitan la recuperación y el análisis de datos al aplicar estándares de datos comunes. La identificación automática de productos, también conocida como *identificación automática* y *captura de datos* (AIDC) son tecnologías que permiten que los datos se ingresen en un sistema informático con poca o ninguna participación humana. El ejemplo más común de AIDC es el uso de códigos de barras en tiendas minoristas. El uso de estos códigos muestra las tres etapas críticas de AIDC:

1. *Codificación de datos*: Los caracteres o números legibles por humanos rara vez son la forma más eficiente para que las tecnologías AIDC representen datos. En su lugar, los datos (como el número de producto) se codifican de alguna manera, como el ancho de las barras en un código de barras.
2. *Lector de datos*: Un dispositivo capaz de leer de forma fiable los datos codificados y convertirlos en un formato de datos apropiado para su transmisión. El escáner de código de barras es un ejemplo de un lector de datos.
3. *Decodificador de datos*: El decodificador de datos convierte la señal del lector de datos de nuevo en los caracteres originales que fueron codificados. Por ejemplo, esto daría el número de código de barras que representa el producto. El software de punto de venta (POS) puede buscar el número en una base de datos y recuperar el nombre y el precio del artículo.

AIDC utiliza muchos tipos de tecnología diferentes, con diferentes ventajas y desventajas. Estos se detallan en la siguiente tabla [10]:

Técnica	Rendimiento	Ventaja	Desventaja
Entrada manual (humana)	Tipo de sensor: <i>Manual</i> Tiempo de entrada: <i>Lento</i> Tasa de error: <i>Alto</i> Coste: <i>Bajo</i>	Bajo coste inicial. Fácil de configurar. Altamente adaptable.	Alto coste continuo (coste del tiempo de un trabajador). Velocidades de entrada lentas. Propenso a error u omisión.
Biometría	Tipo de sensor: <i>Óptico (típico)</i> Tiempo de entrada: <i>Medio</i> Tasa de error: <i>Bajo</i> Coste: <i>Medio</i>	Intuitivo. Identificación rápida de personas. Adecuado para aplicaciones de seguridad.	Aplicabilidad de nicho. A menudo impopular. La configuración inicial requiere la presencia física de las personas.
OCR (Reconocimiento óptico de caracteres)	Tipo de sensor: <i>Óptico</i> Tiempo de entrada: <i>Medio</i> Tasa de error: <i>Medio</i> Coste: <i>Medio</i>	Los datos siguen siendo legibles por el ser humano.	Los caracteres deben ser impresos. Baja densidad de datos. Dependiente de la condición de la tasa de error (p. ej., iluminación).
Visión de la máquina	Tipo de sensor: <i>Óptico</i> Tiempo de entrada: <i>Rápido</i> Tasa de error: <i>Dependiente de la aplicación.</i> Coste: <i>Alto</i>	Aplicación versátil. El equipo puede ser reutilizado para diferentes aplicaciones. Alta velocidad. Puede leer otras formas de codificación de datos como códigos de barras.	El éxito depende en gran medida de la aplicación y la calidad de la implementación.
Código de barras 1D	Tipo de sensor: <i>Óptico</i> Tiempo de entrada: <i>Medio</i> Tasa de error: <i>Bajo</i> Coste: <i>Bajo</i>	Barato para implementar. Versátil. Fácil de imprimir y colocar códigos de barras.	Menor densidad de datos que los códigos de barras 2D.
Código de barras 2D	Tipo de sensor: <i>Óptico</i> Tiempo de entrada: <i>Medio</i> Tasa de error: <i>Bajo</i> Coste: <i>Alto</i>	Altas densidades de datos. Fiable y versátil. Los códigos de barras ocupan más espacio que 1D, pero sigue siendo fácil de usar.	El coste del equipo es superior a los códigos de barras 1D, así que considere si 2D es necesario.
RFID (etiquetas de identificación de radiofrecuencia)	Tipo de sensor: <i>Electromagnético</i> Tiempo de entrada: <i>Rápido</i> Tasa de error: <i>Bajo</i> Coste: <i>Medio</i>	Funcional sin línea de visión. Versátil: existen etiquetas capaces de leer / escribir y etiquetas alimentadas por batería. Alta densidad de datos (con etiquetas más caras).	Más caro por uso que los métodos ópticos. Las etiquetas con alta capacidad de datos o capacidad de lectura / escritura son caras. La calidad y el rango de lectura pueden degradarse en entornos metálicos.

Técnica	Rendimiento	Ventaja	Desventaja
Tarjetas inteligentes (subtipo de RFID)	Tipo de sensor: <i>Electromagnético</i> Tiempo de entrada: <i>Rápido</i> Tasa de error: <i>Low</i> Coste: <i>Medio</i>	Identifica personas sin datos biométricos. Se puede implementar sin que la persona esté presente. Rápido y fácil de usar.	Puede perderse, robarse o hacer mal uso de maneras imposibles en otros tipos.
Banda magnética	Tipo de sensor: <i>Electromagnético</i> Tiempo de entrada: <i>Medio</i> Tasa de error: <i>Low</i> Coste: <i>Medio</i>	Alta densidad de datos. Capacidad de lectura / escritura.	Se requiere contacto físico para leer los datos. Dañado por campos electromagnéticos.

Tabla 6.2 -1 Un resumen de las tecnologías AIDC comunes y sus propiedades.

Es importante tener en cuenta que no existe una tecnología "mejor", todas estas tecnologías están en uso porque ofrecen ventajas y desventajas únicas. Estas tecnologías también pueden implementarse de forma aislada o en combinación para obtener resultados diferentes. Al considerar qué AIDC usar, se deben considerar la codificación, el lector y el decodificador. Por ejemplo, ¿cuál es el área disponible para la codificación? ¿La codificación debe ser legible por humanos y legible por máquinas? ¿Cuántos datos se deben codificar? ¿En qué condiciones debe leerse la codificación, bien iluminada, o irregular y oscura? ¿Se puede ver la codificación o está oculta en el producto?

También es importante tener en cuenta que aunque las tecnologías nuevas y emergentes como la visión artificial pueden ofrecer nuevas capacidades significativas, las tecnologías probadas y probadas como el código de barras 1D siguen siendo tan amplias debido a su operación eficiente, confiable y rentable.

6.2.5 Conclusiones de los sensores

Los sensores son, por supuesto, importantes en la fabricación para el control de procesos, y muchos a menudo están integrados en equipos e integrados en los sistemas de control. Las posiciones de los actuadores, la presencia o ausencia de piezas, las velocidades de rotación de los husillos o las temperaturas de los procesos químicos son todos ejemplos de características del proceso que deben monitorearse para que el proceso tenga éxito, y a menudo es posible que no sepa que los sensores están allí.

Sin embargo, una parte crítica de la creación de un modelo eficaz y útil o gemelo digital es el acceso a datos precisos sobre el sistema que está tratando de modelar. Los sensores integrados en procesos pueden proporcionar datos útiles para un modelo, pero a menudo los datos clave que faltan son externos a los procesos. El movimiento de piezas alrededor de un sistema, el uso de herramientas o materiales, la gestión de inventario y cualquier proceso que deba colaborar pueden requerir la

implementación de sensores adicionales para capturar el rendimiento y los parámetros.

Los sensores pueden leerse directamente (fuentes primarias) o alimentarse a un sistema de control secundario, como un PLC o un ordenador integrado (fuente secundaria), dependiendo de la aplicación. Los datos de estos pueden registrarse en una base de datos, hoja de cálculo, software de monitoreo a medida, incluso grabados manualmente, y luego los datos analizados con el ciclo de procesamiento de datos discutido en la sección 5.2. La diferencia entre los enfoques de modelado convencional de la sección 5.3 y los gemelos digitales es que el modelado convencional toma una instantánea de un sistema y construye un modelo que permanece estático, mientras que un gemelo digital está conectado al registro de datos y puede actualizar constantemente el modelo.

6.3 Gemelos digitales

6.3.1 Categorías de Gemelos Digitales (Digital Twin)

"Digital Twin" es una palabra de moda cada vez más común en la fabricación y a menudo se utiliza mal para referirse a enfoques de modelado y simulación fuera de línea. Como un área emergente, hay pocos estándares formales para gemelos digitales. El grupo de trabajo ISO/IEC JTC1/AG 11 Digital Twin [11] y el comité técnico de datos industriales ISO/TC 184/SC [12] están trabajando en estándares como ISO/DIS 23247-1 [13] Digital Twin Framework for Manufacturing, pero actualmente no están completados. La red alemana Plattform Industrie 4.0 también promovió sus estándares de activos para gemelos digitales, pero esto sirve como un punto de partida en lugar de una arquitectura de referencia completa. Debido a la falta de estandarización, el concepto de gemelo digital sigue siendo diverso, y a menudo la comprensión es impulsada por los proveedores de herramientas de software gemelas digitales. Sin embargo, algunos grupos autorizados han propuesto diferentes clasificaciones de gemelos digitales. Al evaluar el software que dice ser un gemelo digital, vale la pena considerar dónde cae dentro de estas clases.

De acuerdo con Kritzinger *et al.* [14] de Fraunhofer Austria Research, el nivel de integración de datos entre la contraparte física y digital permite la clasificación del enfoque:

1. Un *modelo digital* no utiliza transferencia automática de datos entre el activo real / físico y el modelo virtual, solo transferencia manual de datos. La mayoría no consideraría esto un gemelo digital real, ya que el intercambio manual de datos impide que el objeto digital tenga acceso a datos en tiempo real.
2. Una *sombra digital* (digital shadow) incluye un flujo automático unidireccional de datos desde el activo físico a la representación digital.
3. Un *gemelo digital* tiene datos que fluyen automáticamente en ambas direcciones entre el activo físico y el modelo virtual. En este caso, el gemelo digital es capaz de controlar el objeto físico basado en las decisiones del gemelo digital.

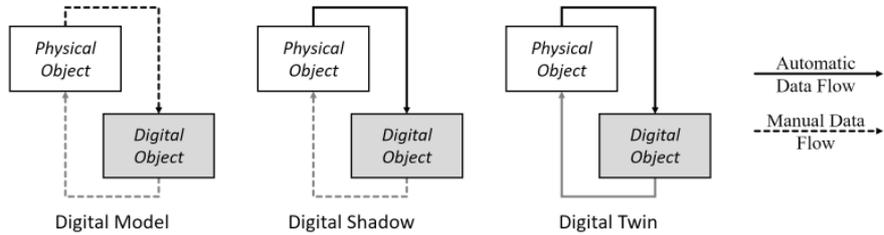


Figura 6.3-1 Las clases de gemelos digitales según Kritzinger. Cuanto más automatizado sea el flujo de información, más cerca estará el resultado de un gemelo digital [14] "verdadero".

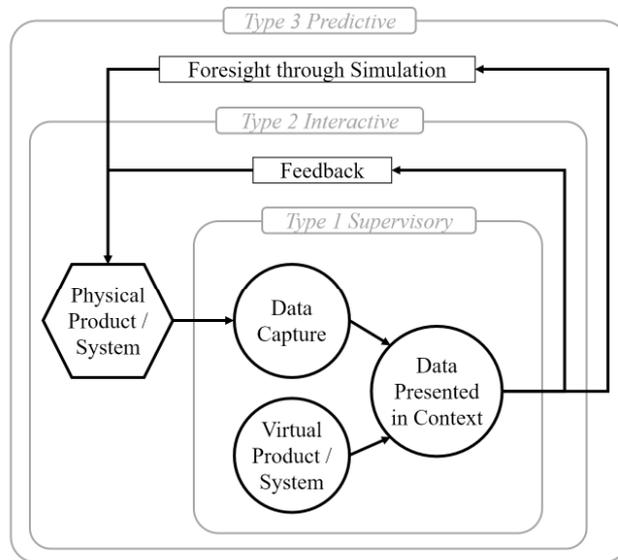


Figura 6.3-2 Los tipos de gemelos digitales están en capas uno encima del otro, de acuerdo con la clasificación AMRC [15].

El Centro de Investigación de Fabricación Avanzada (AMRC) de la Universidad de Sheffield en el Reino Unido ha propuesto clasificar gemelos digitales en función de las capacidades y el valor añadido otorgado por el gemelo digital [15]. La funcionalidad básica es presentar datos en contexto, y el tipo de gemelo depende de si las características de valor añadido opcionales incluyen análisis de datos, control sobre el activo físico y / o predicciones a través de simulaciones. Las tres clases son:

- *Tipo 1 Supervisory Digital Twin*: Un gemelo de monitoreo pasivo, donde los datos se reciben del sistema físico y se combinan en un solo modelo. Este modelo

se puede utilizar para identificar límites de advertencia o umbrales en variables que indican problemas. Aproximadamente igual a una sombra digital en la clasificación de Kritzinger.

- *Tipo 2 gemelo interactivo:* El gemelo digital puede influir en el gemelo físico fijando parámetros para mejorar indicadores de funcionamiento dominantes con algoritmos de control simples. El control puede ser completo o parcial. Aproximadamente igual al gemelo digital completo en la clasificación de Kritzinger.
- *Gemelo digital predictivo tipo 3:* Integra los métodos de simulación y análisis para predecir el rendimiento basado en los datos de proceso del gemelo físico y utilícelos para optimizar los parámetros de procesamiento, y luego realizar estos ajustes de forma proactiva según sea necesario en el gemelo físico.

6.3.2 Elementos de gemelos digitales

Debido a la actual falta de estándares, los componentes y los requisitos técnicos de un gemelo digital varían con el tipo, la clasificación y el proveedor del gemelo digital. Sin embargo, están surgiendo algunos elementos comunes.

- *Obligatorio: Gemelo físico conectado en tiempo real.* A veces bajo considerado, un gemelo digital requiere un gemelo físico, típicamente un producto o sistema. El gemelo físico puede ser un tonto y / o poco comunicativo, o un producto / sistema inteligente capaz de comunicarse de máquina a máquina (M2M) o de comunicarse con humanos. El gemelo digital requerirá sensores (ya sea integrados en productos / sistemas inteligentes, o soluciones IoT agregadas después), los estándares de comunicación para compartir los datos con el gemelo digital y la capacidad de hacerlo en tiempo real. Lo que califica como en tiempo real depende de la aplicación, pero generalmente se considera en el orden de milisegundos.
- *Obligatorio: Modelo.* El gemelo digital requiere un equivalente virtual del gemelo físico que da contexto a los datos recopilados, diferenciándolos de una base de datos o lago de datos. A pesar de esta diferencia, el gemelo digital todavía requiere almacenamiento para los datos recopilados, y una base de datos puede ser la implementación técnica subyacente de esto. El modelo es uno de los elementos más difíciles de definir, ya que es altamente específico de la aplicación: un modelo de fábrica puede implementarse de manera diferente a un modelo de motor a reacción, por ejemplo. Los modelos 3D del gemelo físico son una consideración común, pero no obligatoria.
- *Opcional: Analytics y Simulación.* Uno de los casos de uso más comúnmente previstos de gemelos digitales es utilizar el gemelo para realizar análisis y entender la mejor manera de controlar el gemelo físico. Esto se logra normalmente mediante el uso de simulación y análisis. Puede parecer extraño que esto aparece como opcional – ¿cuál es el punto de un modelo si nunca se ejecutan simulaciones en él? sin embargo, como se describe por la clasificación

AMRC [15], un gemelo digital puede ser sólo una forma de presentar datos en contexto sin ningún análisis realizado directamente. Los análisis y las simulaciones siguen siendo una característica deseable muy común, por supuesto, pero no son obligatorios. Se pueden incluir múltiples técnicas de análisis y simulación diferentes en gemelos digitales dependiendo de la aplicación, con la intención de identificar problemas u oportunidades de antemano en función de los datos entrantes y el estado del gemelo físico.

- *Opcional: Control.* Dar a un gemelo digital la capacidad de controlar el gemelo físico no es obligatorio (ver gemelos digitales de supervisión tipo 1) pero, al igual que el análisis y la simulación, es un uso previsto muy común. Los sensores en el gemelo físico permiten la captura de datos, pero de manera similar los actuadores pueden permitir que el gemelo digital cambie parámetros u otros elementos del sistema de control del gemelo físico. Esto suele ser junto con herramientas de análisis o simulación para tomar las decisiones para cambiar los parámetros, que luego se promulgan en el gemelo físico.

6.3.3 Aplicaciones de gemelos digitales

Los gemelos digitales se pueden utilizar en una amplia gama de aplicaciones, incluida la automatización de vehículos, la generación de energía, el modelado del tráfico y la planificación urbana, la atención médica y más. Aquí, sin embargo, nos centraremos en algunas aplicaciones específicas de fabricación [1].

- *Replicación de la línea de producción:* Una de las aplicaciones más comúnmente previstas de los gemelos digitales para la fabricación es la creación de una réplica digital de una línea de producción o de una fábrica completa. Las simulaciones de fabricación no son nuevas, pero se basan en un alto grado de comprensión del proceso que se está simulando. La naturaleza conectada en tiempo real de los gemelos digitales permite que la simulación en vivo mejore con el tiempo, se monitoree y optimice en función del estado en tiempo real del sistema y responda a eventos nuevos e inesperados. El gemelo digital sirve dos objetivos principales aquí. En primer lugar, los datos capturados para el sistema de producción se unifican y se mantienen en un solo lugar, lo que simplifica el monitoreo y permite recuperar instantáneas históricas del comportamiento del sistema en caso de fallo. En segundo lugar, el gemelo digital puede ejecutar simulaciones de *ejecución frontal*, utilizando la naturaleza en tiempo más rápido que real de las simulaciones para "avanzar rápidamente" y predecir el estado del sistema en el futuro [16].
- *Replicación de productos:* Incluso los sistemas de fabricación complejos pueden producir productos simples que no requieren un gemelo digital. Sin embargo, cuando el producto es tan complejo como el sistema que lo crea, un producto gemelo digital puede ofrecer algunas ventajas. De manera similar a la replicación de la línea de producción, el uso de un gemelo digital para un producto ayuda a recopilar todos los datos generados en su creación en un solo lugar, lo que es útil

para dominios altamente regulados como el aeroespacial o los farmacéuticos. Los gemelos digitales también se pueden integrar con los sistemas de monitoreo del ciclo de vida del producto para garantizar que se realicen los procesos esperados en el producto, particularmente cuando existen grandes fuentes de incertidumbre en el proceso de fabricación o cuando se cambian las configuraciones a medida que se fabrica el producto.

- *Mantenimiento preventivo*: El mantenimiento preventivo es una técnica clave para prevenir averías costosas al programar el mantenimiento durante las pausas en la producción para reemplazar los componentes desgastados antes de su falla esperada. El mantenimiento preventivo normalmente se programa regularmente en función de la experiencia del operador y la orientación del fabricante del equipo. El mantenimiento predictivo supervisa el estado del equipo con sensores para mejorar la estimación de cuándo se debe realizar el mantenimiento. Esto ayuda a determinar si el equipo fallará antes de lo previsto o si el mantenimiento se puede retrasar, ahorrando dinero.

Un gemelo digital de equipos de producción ayuda en la implementación del mantenimiento predictivo al permitir la recopilación y el análisis de datos de sensores del equipo y el análisis en funcionamiento para predecir la ventana de mantenimiento óptima. Los datos de averías anteriores se pueden usar para ayudar a identificar nuevas averías inminentes, y los datos en tiempo real del equipo se pueden comparar con datos "ideales" pasados para buscar desviaciones.

- *Planificación robótica / cobótica*: La programación de rutas robóticas industriales a menudo se desarrolla con simulaciones fuera de línea para trazar y probar los programas propuestos, utilizando paquetes de software como ABB RobotStudio, KUKA.Sim o Dassault Systemes DELMIA. Estas son excelentes herramientas para tareas altamente predecibles y repetitivas. Donde los gemelos digitales pueden ayudar a este proceso es donde el proceso robótico es variable o impredecible. Esto puede ocurrir cuando el producto es grande, flexible o de una calidad desconocida. La impredecibilidad también puede ocurrir cuando los humanos están involucrados en el proceso, y la creciente popularidad de la robótica colaborativa o cobótica donde los robots y los seres humanos trabajan juntos en.

La seguridad es fundamental para la implementación exitosa de la cobótica y los gemelos digitales permiten que la simulación utilizada para la planificación del movimiento se actualice en tiempo real para garantizar que se tenga en cuenta la posición y el movimiento del trabajador humano. También podrían permitir técnicas de realidad virtual o aumentada para mejorar la interacción del trabajador humano y el control del cobot.

6.3.4 Ejemplos de software gemelo digital

Los gemelos digitales son una tecnología emergente y un campo que cambia rápidamente. Sin estándares claramente definidos para los gemelos digitales, lo que

hace y no califica como un gemelo digital es ambiguo. Además, muchos paquetes gemelos digitales ofrecidos son en realidad múltiples piezas de software que trabajan juntos para implementar el gemelo digital. Estos paquetes a menudo utilizan un paquete de modelado y simulación existente (como los mencionados en la sección 5.3.5) con complementos para recopilar datos en tiempo real. Debido a la naturaleza inicial de las tecnologías, se recomienda que investigue soluciones y desarrollos antes de comprometerse con un producto o paquete específico, y preste especial atención a los tipos y elementos de gemelos digitales para que pueda estar seguro de lo que está comprando hace lo que espera. Sin embargo, aquí hay algunos ejemplos de soluciones o paquetes en el mercado.

- *Siemens Digital Enterprise*: La oferta gemela digital de Siemens es una combinación holística de una gama de sus productos de software en lugar de una sola pieza dedicada de software, pero estos pertenecen a la cartera de Digital Enterprise. Dependiendo del área de aplicación, se utilizarán diferentes herramientas. Por ejemplo, en un entorno farmacéutico se utiliza STAR-CCM+ como modelo, HEEDS para el análisis, y SIMATIC SIPAT se utiliza para monitorear la calidad en tiempo real. Como Siemens también ofrece una amplia gama de equipos de automatización y detección industrial, se simplifica la integración de este enfoque en un gemelo digital en tiempo real.
- *GE Digital Predix*: Predix es una plataforma de datos basada en la nube que puede recopilar datos de fuentes de IoT, contextualizarlos con un modelo y utilizar algoritmos de análisis para predecir eventos futuros. Tiene múltiples aplicaciones declaradas, incluyendo modelado de componentes, activos, sistemas y procesos.
- *Dassault Systemes 3DEXPERIENCE*: Otra gran cartera de software, 3DEXPERIENCE cubre el diseño de productos, la planificación de procesos, la simulación y el análisis, y la gestión de datos de productos. Llamando a los gemelos digitales "3DEXPERIENCE Twins", el paquete cubre la gama de elementos necesarios para un gemelo digital. Otras compañías también han utilizado 3DEXPERIENCE como base para sus propios productos gemelos digitales, como el AIM^{3D} de Veristar, especializado en grandes embarcaciones y modelado de plataformas de gas / petróleo.
- *Microsoft Azure Digital Twins*: Actualmente se encuentra en una fase de prueba pública, Azure Digital Twins es una próxima solución gemela digital basada en la nube con un enfoque de modelado de "gráfico de inteligencia espacial" neutral en el dominio e integración con las capacidades existentes de IA, aprendizaje automático y entrada de datos de IoT de Azure. Microsoft también se ha asociado con *Ansys Twin Builder* para agregar capacidades adicionales en torno al mantenimiento predictivo.

6.3.5 Desafíos de implementación

Como área emergente, hay varios desafíos para los gemelos digitales para superar para convertirse en la corriente principal. Estos se resumen aquí, y son aspectos a tener en cuenta antes de adoptar cualquier solución gemela digital específica.

- *Normas e interoperabilidad:* Como se discutió en la sección 6.3.1, actualmente hay una falta de normas industriales para los gemelos digitales, e incluso cuando se finalizan la adopción llevará tiempo. Como resultado, la interoperabilidad entre diferentes proveedores de soluciones gemelas digitales o componentes de una solución puede ser limitada. Muchas herramientas actuales se basan en conjuntos existentes de software de fabricación, y mezclarlas y combinarlas puede ser costoso o no posible.
- *Confianza:* Una parte clave del argumento de venta de gemelos digitales es que un sistema se auto-optimice, con análisis y simulaciones que se ejecutan en datos en vivo y los hallazgos que se utilizan para sintonizar y optimizar el gemelo físico. Sin embargo, esto requiere un nivel de confianza en nombre de los operadores: algunas decisiones incorrectas o deducciones incorrectas podrían causar que los adoptantes gemelos digitales corten el bucle de control automatizado y, en su lugar, utilicen el gemelo digital como asesor en lugar de completamente integrado.
- *Cantidades de datos:* Un aspecto clave de los gemelos digitales es recopilar datos en tiempo real en un solo lugar y poder presentarlos en contexto (ver Figura 6.3-2). Este enfoque no es diferente a los data lakes y almacenes de datos, pero a diferencia de estos enfoques, los gemelos digitales requieren los datos centralizados en tiempo real. Dependiendo de los volúmenes de datos, la distancia de las fuentes de datos y el método de transmisión de datos, el envío de datos sin procesar puede simplemente no ser posible. El procesamiento previo de los datos antes de la transmisión puede ayudar en cierto modo a aliviar.
- *Ciberseguridad:* Cualquier empresa que innova en la Industria 4.0 es desafortunadamente un objetivo para entidades maliciosas, desde individuos, pandillas organizadas hasta estados nacionales. Irdeto encontró que 79% de las empresas encuestadas que implementan IoT ha sufrido algún tipo de ataque cibernético contra sus sistemas IoT en el año anterior [17]. Las consecuencias de un ataque cibernético en un gemelo digital podrían ser significativas, que van desde la interrupción del gemelo físico, ataques de ransomware o robo de propiedad intelectual debido a la riqueza de datos almacenados en el gemelo digital. Los métodos típicos de seguridad industrial, como la seguridad del hardware y la separación de aire, ya no son suficientes. En su lugar, se debe implementar una protección basada en software, se debe promulgar un proceso comercial bien definido para las actualizaciones de software / firmware y se debe cifrar los datos cuando sea posible.

- *Implementación*: Los gemelos digitales requieren la participación de una amplia gama de equipos y personas dentro de un negocio para aprovechar al máximo el enfoque. Una palabra de moda común para los gemelos digitales es "holística", es decir, algo que es más que la suma de sus partes, pero en este caso la palabra es apropiada. Los gemelos digitales pueden extraer datos de toda una empresa, y si los datos aún no están organizados o bien entendidos, el proceso de implementación de gemelos digitales puede ser doloroso. Gartner [18] lanzó un estudio realizado en 2017 entre 202 compañías y describió cuatro mejores prácticas para implementar y mantener gemelos digitales:
 1. Las inversiones en soluciones gemelas digitales podrían estar impulsadas por la cadena de valor del producto o del proceso, entendiendo por qué las partes interesadas necesitan acceso a los datos o el control del gemelo físico es clave.
 2. Se deben llevar a cabo procedimientos documentados estandarizados durante la creación del gemelo digital para garantizar que este sistema potencialmente altamente complejo esté bien documentado y comprendido, lo que facilitará los cambios y las actualizaciones.
 3. El uso y el acceso a los datos deberían ser posibles desde múltiples fuentes para permitir la interacción y evolución del gemelo digital. Esto puede requerir que se desglosen los silos de datos existentes y se implementen estándares dentro de la empresa para que se pueda acceder a los datos de manera más amplia.
 4. Se debe evitar el software propietario y los formatos no estándar para garantizar que la empresa no se bloquee en un enfoque o no pueda integrar nuevos componentes de software.

6.4 Sistemas de apoyo a la decisión

6.4.1 Implantación

A lo largo de este libro se ha discutido el concepto de toma de decisiones y se ha destacado su importancia. El papel del análisis en la fabricación es permitir que se tomen mejores decisiones y, por lo tanto, que el negocio sea más productivo y más rentable. Todas las herramientas y métodos que hemos discutido existen para informar las decisiones. Sin embargo, existe otra clasificación de herramientas que pueden ayudar a la toma de decisiones: el Sistema de Apoyo a las Decisiones (DSS).

Un DSS es un sistema de software para apoyar la toma de decisiones en una empresa, incluyendo, pero no limitado a la fabricación. Por lo general, tienen un área de interés limitada (el *dominio*) en la que ayudan a las decisiones. Por ejemplo, los DSS son cada vez más comunes en el campo médico para ayudar con los planes de diagnóstico y tratamiento donde los problemas están lejos de estructurarse. Hay tres clases de DSS, que representan el tipo de soporte que brindan:

- *Pasivo*: Ofrece información y análisis para ayudar a un ser humano en el proceso de toma de decisiones, pero no ofrece ninguna sugerencia o solución directa.

- *Activo*: Analiza los datos disponibles para ofrecer sugerencias y soluciones al usuario.
- *Cooperativa*: Ofrece sugerencias y soluciones al usuario, pero también toma comentarios del usuario para refinar y mejorar las decisiones y sugerencias. Sin embargo, estos son raros fuera de la investigación.

Además, los DSS se dividen en cuatro clases adicionales en función del tipo de asistencia que ofrecen, y estos se analizan en la siguiente sección.

6.4.2 Clases de sistema de apoyo a la decisión

6.4.2.1 Impulsado por las comunicaciones

Tal vez la forma más común de DSS, y uno que puede estar utilizando sin darse cuenta de que es una herramienta de apoyo a la decisión en absoluto. El *DSS basado en las comunicaciones* (CD-DSS) facilita las decisiones al permitir a los usuarios compartir información para tomar una decisión colectivamente. A menudo se les llama sistemas de apoyo a la decisión de grupo por esta razón. Un CD-DSS no genera ni analiza datos por sí mismo, sino que los pone más a disposición de los usuarios, incluidos los usuarios que están distribuidos en lugar de ubicados conjuntamente, y que se comunican de forma asíncrona.

Algunos ejemplos incluyen herramientas de uso compartido de documentos como Google Docs o Microsoft SharePoint, y herramientas de colaboración como Slack o Microsoft Teams. Incluso las soluciones de teleconferencia como Skype o Zoom a veces se describen como CD-DSS. Estos sistemas permiten a los usuarios tomar mejores decisiones sobre problemas no estructurados y semiestructurados mediante una mejor puesta en común y el intercambio de experiencias y conocimientos, en lugar de que el problema sea abordado por un solo individuo. Los CD-DSS son ejemplos de DSS pasivos.

6.4.2.2 Impulsado por datos

Para problemas semiestructurados e incluso algunos estructurados, puede haber datos disponibles para informar la decisión, pero en un formato que dificulta o imposibilita su uso para el tomador de decisiones. Los DSS basados en datos (DD-DSS) toman datos (generalmente datos de series temporales) y los presentan al usuario de una manera más informativa, posiblemente después de un análisis inicial de los datos. Los datos se obtendrán de una base de datos o bases de datos de la empresa, y también a veces incluyen fuentes de datos externas. Los datos suelen ser históricos, pero a veces incluyen datos en tiempo real. El mayor desafío con los enfoques DD-DSS es la integración de los datos: cómo se capturan los datos generados por la máquina e integran con los datos generados por el hombre.

Un tablero de fabricación es un ejemplo común de un DD-DSS en la industria, que muestra datos clave extraídos de múltiples fuentes para dar una indicación clara del estado de la planta de producción, de la cartera de pedidos o de la productividad.

Algunos ejemplos comunes incluyen Microsoft Power BI, Dundas BI y Tableau, pero muchas empresas también desarrollan paneles personalizados con bibliotecas de visualización como Shiny o Grafana de R Studio. Muchos enfoques se integran directamente en la base de datos, como SAP HANA. Incluso las funciones de informes y gráficos de una hoja de cálculo pueden lograr estos objetivos.

Los DD-DSS son el segundo ejemplo más común de DSS, y el más común que las personas comúnmente consideran como DSS. A menudo se les conoce como paquetes de Business Intelligence, lo que refleja la creciente sofisticación de las herramientas ofrecidas. Por lo general, son pasivos, pero cada vez más tienen herramientas activas de apoyo a la decisión.

6.4.2.3 Impulsado por el modelo

Los DSS basados en modelos (MD-DSS) utilizan modelos de simulación para apoyar la toma de decisiones al ofrecer predicciones de los resultados de los cambios en las circunstancias existentes. Estos pueden ser modelos numéricos construidos en hojas de cálculo, diseño asistido por ordenador (CAD) modelos de productos, y simulaciones 3D de los procesos de fabricación.

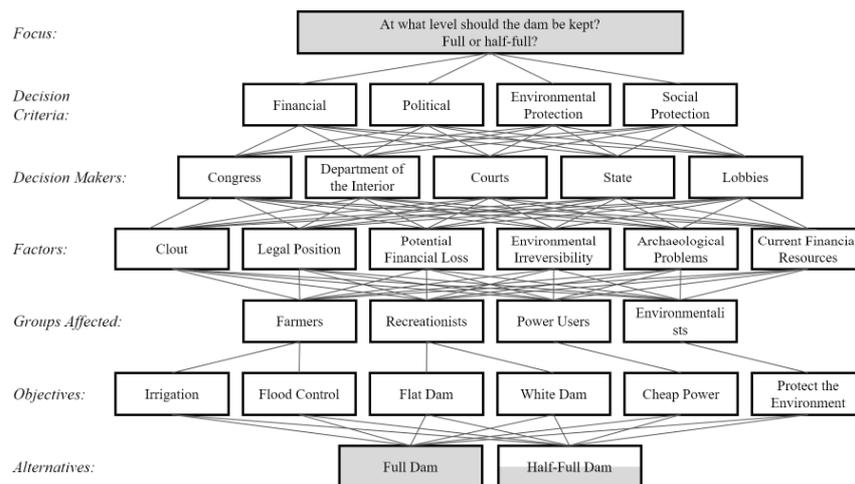


Figura 6.4-1 Los procesos de jerarquía analítica se utilizan para comenzar a deconstruir problemas extremadamente complejos y subjetivos para tratar de estructurarlos en un modelo que permita probar alternativas.

La simulación por ordenador ofrece la gran ventaja de estudiar y analizar estadísticamente escenarios hipotéticos, reduciendo el tiempo y el coste general requeridos para la toma de decisiones. La simulación de Monte Carlo, la simulación de eventos discretos, la simulación de agentes y múltiples agentes, la dinámica del sistema y la simulación visual son cada vez más comunes en la fabricación, y se

analizan en la sección 5.3, La introducción de la visualización avanzada basada en simulación de diseños CAD con tecnologías de interacción y colaboración como la realidad aumentada. Los modelos y simulaciones suelen ser sistemas DSS activos, que dan al usuario los resultados de sus opciones propuestas y, en algunos casos, ejecutan algoritmos para mostrar la opción óptima para un problema.

También en la categoría MD-DSS están los modelos de análisis de decisiones (DAM). Los DAM son herramientas y métodos estadísticos como los procesos de jerarquía analítica (AHP), el análisis del árbol de decisión, el análisis de decisiones de múltiples criterios y el pronóstico probabilístico para respaldar la toma de decisiones donde se deben considerar múltiples criterios y no hay una respuesta óptima única.

6.4.3 Impulsado por el conocimiento

Los DSS basados en el conocimiento (KD-DSS) recopilan datos, información y conocimiento de la empresa y de fuentes externas. Luego usan esta base de datos de conocimientos pasados para tomar decisiones con técnicas de inteligencia artificial (IA) y recomienda acciones. KD-DSS utiliza técnicas de IA para combinar grandes cantidades de conocimiento de dominio y experiencias pasadas para formar nueva información. Los sistemas expertos (que alcanzaron su máxima popularidad en los años 1980 y 90) son una forma de KD-DSS y se usan reglas y heurísticas *if-then* para resolver problemas. Los KD-DSS más modernos utilizan los últimos desarrollos en técnicas de IA como redes neuronales, aprendizaje automático, lógica difusa y algoritmos genéticos.

Los DSS basados en el aprendizaje recíproco (RL-DSS) son una subclase de KD-DSS y pueden aprender de decisiones comunes y hacerse cargo de esta toma de decisiones para reducir la carga de toma de decisiones humanas. Las tareas de decisión de rutina se pueden aprender y programar, y los tomadores de decisiones pueden actualizar sus conocimientos y ayudar a crear decisiones más inteligentes que antes posibles para problemas semiestructurados.

En un entorno de fabricación, capturar el conocimiento de dominio experto es un desafío. En cambio, la mayoría de los sistemas KD-DSS de fabricación modernos utilizan la minería de datos y el aprendizaje automático para tomar grandes volúmenes de datos históricos y usarlos para determinar el curso de acción óptimo en lugar de confiar en que los expertos del dominio conviertan sus conocimientos en reglas. El aprendizaje automático está demostrando ser extremadamente exitoso para problemas de clasificación como la clasificación de defectos, la detección de problemas con los procesos de fabricación para que se pueda realizar un mantenimiento proactivo y preventivo, y la creación de modelos de procesos de fabricación que antes eran demasiado complejos para que los humanos lo comprendan completamente.

Un ejemplo famoso es Watson de IBM. Watson es un sistema informático de preguntas y respuestas de lenguaje natural y es una forma de KD-DSS, que utiliza un enorme banco de datos de conocimientos y reglas para responder rápidamente a

las preguntas. Se utiliza este enfoque para ganar el primer lugar en el programa de juegos Jeopardy!, superando a los campeones anteriores por un margen significativo. Watson utiliza un método complejo para responder preguntas, pero aún comparte el mismo enfoque que cualquier otro KD-DSS. Cómo responder a la pregunta es la decisión, y utiliza bases de datos de información para proponer posibles soluciones, y luego una segunda base de datos para determinar qué solución es más probable que tenga éxito. Este proceso toma milisegundos.

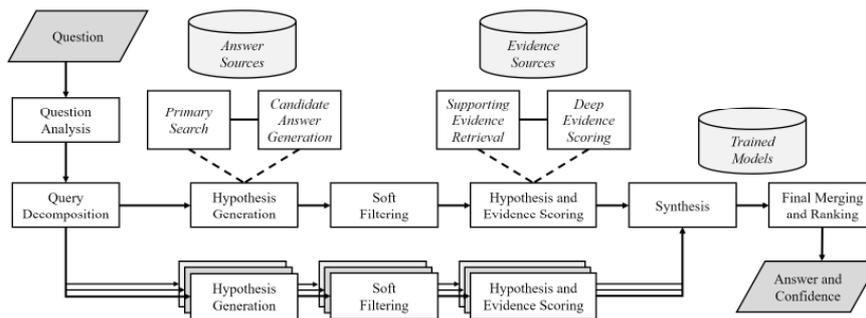


Figura 6.4-2 Watson de IBM utilizó el procesamiento avanzado del lenguaje natural para analizar el significado de una pregunta, y luego se basa en una vasta base de datos de información para hipótesis de respuestas y sopesarlas con respuestas. Watson puede estar a la vanguardia de los sistemas DSS, pero las técnicas utilizadas son cada vez más comunes en soluciones comerciales.

6.5 Estudios de caso

6.5.1 Supervisión del piso de la tienda – Rold

Rold es una empresa de tamaño mediano en el sector de componentes de electrodomésticos. La empresa tiene un alto nivel de flexibilidad y responsabilidad debido a ser una empresa familiar, y han sido capaces de combinar esto con la introducción de enfoques de gestión modernos y novedosas tecnologías, actualizando constantemente sus estándares en la búsqueda del mejor rendimiento para ofrecer al mercado.

La compañía estaba experimentando los siguientes problemas en su planta de producción:

- Maquinaria de producción no conectada entre sí, por lo que no permite, por ejemplo, un control eficiente del consumo de energía, así como el análisis de los datos de producción.
- Los datos no están disponibles en tiempo real y se comunican en papel, retrasando la identificación de problemas y rectificando la acción.

- Presencia generalizada de información subjetiva y no objetivada por el proceso, respondiendo a la experiencia del operador.
- Dificultad para tener visibilidad de los procesos entre plantas, lo que dificulta la identificación de problemas de "imagen general".
- Tecnologías digitales no muy comunes a nivel de taller.
- Necesidad de empoderamiento del operador en el control de procesos.

Muchas empresas pequeñas y medianas buscarán empresas de TI externas o proveedores de soluciones para obtener ayuda con gemelos digitales o sistemas de soporte de decisiones. Sin embargo, debido al tamaño de Rold, poseía la experiencia interna para desarrollar su propia solución, que desde entonces se ha convertido en un producto comercial. Rold SmartFab es el resultado de la colaboración de investigación y desarrollo de Rold, que ha reunido los conocimientos y tecnologías internas de la compañía para crear un sistema para fabricar PYME que permite monitorear y analizar información proveniente de las plantas de subsistemas de la compañía, y ponerlas a disposición en dispositivos fijos, móviles y portátiles. SmartFab es adecuado para empresas en los sectores mecatrónico y de fabricación, ya que adquiere el estado operativo de las máquinas y lo presenta de una manera fácil de usar, en tiempo real y en dispositivos inteligentes en cualquier lugar. Esto permite identificar rápidamente los problemas de producción, como el tiempo de inactividad y ralentizaciones significativas. Esta plataforma de fabricación digital permite:

- Monitoreo en tiempo real de líneas de producción.
- Datos y alarmas en tiempo real en dispositivos de pantalla táctil y dispositivos móviles, así como dispositivos portátiles que son fáciles de usar (por ejemplo, relojes inteligentes).
- Usando estándares abiertos y middleware, permitiendo que las máquinas modernas se comuniquen con las más antiguas.
- Reducción de costes a través de una reducción de los tiempos de intervención técnica y mantenimiento.
- Empoderamiento de los operadores en el control de procesos ya que ahora pueden acceder rápidamente a información objetiva.

Una reducción del consumo de energía y los costes asociados gracias a la posibilidad de medir el uso de energía de los recursos de producción individuales en tiempo real. Aumentar el nivel de las habilidades blandas de los operadores en términos de digitalización, allanando el camino para el futuro. La empresa necesitaba principalmente superar las barreras tecnológicas relacionadas con la necesidad de conectar máquinas heterogéneas, incluidos los sistemas heredados sin interfaces estándar. Esto demuestra la importancia de los estándares abiertos en la digitalización de la fabricación. Si intenta recopilar datos de varias máquinas antiguas y nuevas, de varios proveedores con múltiples protocolos de

comunicación, es posible que tenga problemas a menos que pueda usar estándares comunes.

6.5.2 Detección remota - Alascom

Alascom es una empresa mediana de servicios de tecnología de TI fundada en 2001 y con sede en Milán, Italia. Alascom ha desarrollado una amplia experiencia en telecomunicaciones e integración de sistemas. Durante varios años, ha implementado una estrategia de aportación de soluciones combinada con el desarrollo de nuevas soluciones innovadoras para integrar el ámbito de producción con el ámbito de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), ampliando el enfoque para cubrir el Internet de las Cosas (IoT), la Industria 4.0 y el análisis de datos. Alascom es experto en análisis estadístico y herramientas de programación, modelos matemáticos, aprendizaje automático de IA y en memoryDB.

Alascom tuvo la tarea de implementar sistemas de monitoreo para una gama de plantas de biogás para proporcionar una visión completa de toda la red de plantas, así como de las plantas individuales. Las plantas de biogás son sistemas complejos que obtienen energía “limpia”. Debido a su complejidad, mantener el correcto funcionamiento es fundamental para garantizar flujos de ingresos constantes, así como para evitar costes adicionales por averías, fallos de funcionamiento y tiempos de inactividad. Además, mejorar la eficiencia y la eficacia de la producción de energía eléctrica de las plantas es otro objetivo fundamental que puede ser posible mediante un mejor seguimiento. La dispersión geográfica de las plantas y la incapacidad de mantener personal de mantenimiento especializado en el sitio y mejorar el rendimiento de producción significa que cualquier solución de monitoreo debe ser remota, centralizada y granular.

El monitoreo proporciona una visión completa de toda la planta y los detalles de los sistemas monitoreados individuales. El objetivo es mejorar la eficiencia del proceso de producción a través del uso de software que permita maximizar la relación ingresos / costos, tener una mayor comprensión del proceso en sí y comprender mejor el impacto de los diferentes modos de operación para reducir la complejidad de la gestión de la red.

El software, diseñado para ser adaptable a diferentes plantas de producción, es capaz de normalizar los datos procedentes de múltiples sitios permitiendo la comparación entre diferentes plantas en alcance y tamaño; la mayor cantidad de datos se puede analizar para beneficiar a cada planta. La arquitectura de software toma datos de sensores de medidores inteligentes recién instalados y realiza análisis de datos. Los pasos son los siguientes:

1. Los medidores de energía inteligentes instalados en la planta de biogás se utilizan para controlar el consumo eléctrico de los sistemas auxiliares.

2. Los “concentradores” recopilan y combinan datos de los contadores inteligentes a una frecuencia especificada y devuelven los valores de una manera compatible con los estándares en el canal Ethernet físico y el protocolo Modbus TCP.
3. Las puertas de enlace de IoT adquieren datos de múltiples fuentes, normalizan los datos y los envían a la base de datos de una plataforma digital, donde los datos se procesan y presentan. Este elemento arquitectónico es capaz de comunicarse con diferentes sistemas, en particular con los concentradores para la adquisición de mediciones eléctricas de los sistemas auxiliares de biogás, y con los controladores de proceso para la adquisición de datos disponibles del sistema de control existente.
4. Por último, una plataforma digital compuesta por una base de datos en la nube y una interfaz de usuario basada en la web. El primer nivel arquitectónico adquiere datos normalizados, que luego se almacenan y se ponen a disposición de la interfaz del servicio web. El front-end está desarrollado con tecnologías de servicios web, permite la visualización de datos de planta con indicadores adecuados, dashboards y tablas definidas con el apoyo de los expertos de dominio de la empresa cliente. Los filtros disponibles en la interfaz web permiten al usuario introducir solicitudes específicas y obtener información analizada - gráfica o numérica- en forma descriptiva o estadístico-predictiva. El sistema, mediante el uso de algoritmos apropiados que operan sobre los datos disponibles, sugiere automáticamente qué acciones deben llevarse a cabo y cuándo, también teniendo en cuenta las restricciones impuestas por el usuario.

La integración de sensores y la solución de software fue un éxito: todas las plantas de biogás se pueden monitorear de forma remota desde una sola ubicación, lo que reduce los costos y mejora la eficiencia de las plantas. Sin embargo, el proyecto no estuvo exento de desafíos, y la integración de los expertos en plantas de biogás de la empresa cliente, la consultoría de expertos en sensores inteligentes y los propios ingenieros de software de Alascom fue el mayor desafío que enfrentaron.

6.5.3 Sistemas de transporte conectados – Bellini

Bellini es una pequeña empresa especializada en el desarrollo, producción, comercialización y asistencia técnica de lubricantes y fluidos. Debido a las complejidades de la fabricación de productos químicos y al peso de los materiales y productos, Bellini quería revisar el proceso de producción con la integración de software para monitoreo remoto, así como la integración de vehículos guiados automatizados (AGV) para materiales automatizados y transporte de productos.

Actualmente, los operadores de planta utilizan controladores lógicos programables (PLC) independientes para controlar el proceso de producción: la información no se comparte con el software de planificación de recursos empresariales (ERP). Es necesario mejorar la interfaz de usuario en el área de silos y mezcladores para que la información necesaria para llevar a cabo las actividades

dentro del proceso sea más completa y compartida con el sistema ERP. Además, el manejo de materiales y productos entre la producción y el departamento de logística se realiza manualmente. Es necesario implementar un sistema de transporte para el manejo automatizado desde el departamento de producción hasta la bahía de envío.

Dadas las necesidades especificadas, la compañía decidió comprar un programa de software para monitorear el progreso de las actividades. En particular, la intervención contempló la introducción de un software para el control remoto de los PLC, la renovación de los sensores y la sustitución de los paneles LCD actuales en el equipo por pantallas táctiles intuitivas y más grandes. Un mejor acceso a la información, lo que permite su visualización remota o simplemente de una manera clara y unificada es un ejemplo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones basado en datos. Ser capaz de ver claramente el estado de un sistema de un vistazo hace que la toma de decisiones rápida y efectiva sea más simple y menos propensa a errores. Gracias al acceso remoto de los datos del PLC, será posible identificar fallas del equipo y otras pérdidas más rápido. El acceso remoto de los datos del PLC evita la entrada manual de datos, lo que reduce el tiempo del trabajador y menos errores introducidos.

El control de AGV a menudo requiere un enfoque doble digital para el enrutamiento de trabajos altamente dinámico típico de empresas dinámicas más pequeñas: la ubicación en vivo de los AGV debe controlarse para garantizar que el material se pueda enrutar donde y cuando sea necesario de manera segura. El nuevo sistema automatizado de manipulación de materiales permitirá el movimiento de material entre los dos departamentos de forma automatizada, gracias a la utilización de un AGV conectado a sensores de posicionamiento, tanto a bordo como en la planta. Los AGV son más eficientes energéticamente que las máquinas de manipulación manual actuales (principalmente carretillas elevadoras) ahorrando costos. El tiempo de manipulación manual del material se reduce gracias al uso del AGV.

El principal desafío fue la búsqueda de la solución tecnológica adecuada. Uno finalmente se encontró después de 4 meses de estudio de diseño. También fue una inversión extensa tanto para adquirir como para planificar la integración del sistema. Al igual que con cualquier inversión significativa en tecnologías de fabricación digital, es de vital importancia tener un caso de negocio sólido desarrollado que muestre el valor de la solución propuesta para el negocio.

6.6 Conclusión

Este capítulo discutió los últimos avances en el análisis de la producción, incluido el uso de modelos y simulación en línea (gemelos digitales) y herramientas de soporte para la toma de decisiones (sistemas de soporte de decisiones), así como detallando algunos casos de uso de ejemplos de cómo el acceso a los datos y el uso de simulaciones pueden ayudar a las empresas.

Como estos campos son nuevos y/o evolucionan rápidamente, es importante comprender sus fortalezas y limitaciones. Hay una gran cantidad de bombo en torno a los gemelos digitales, y la falta de estándares significa que muchos productos pueden ser etiquetados como gemelos digitales sin necesariamente tener la funcionalidad que se podría esperar. Aunque las ventajas potenciales de los sistemas en línea son significativas, existen riesgos de invertir en tecnología que pueden no ser totalmente compatibles en el futuro y que pueden no aportar inversiones.

Críticamente antes de hacer cualquier inversión en un nuevo paquete de modelado de sistema gemelo digital es desarrollar un caso de negocio para ello. ¿Qué preguntas nos permitirá responder este nuevo enfoque que antes no podíamos? ¿Cómo usaremos la nueva información para mejorar la productividad (o cualquier otro indicador clave de rendimiento)? ¿Qué cambios tendremos que hacer en nuestros procesos de trabajo y cuánto tiempo durarán la formación y la aclimatación? Particularmente para los gemelos digitales donde los estándares establecidos no se han resuelto y las palabras de moda se utilizan con frecuencia, es importante entender exactamente lo que se ofrece y los costos y beneficios potenciales de los mismos.

Si hay una lección crítica en este libro, es que las fórmulas matemáticas, el software de modelado digital, los sistemas de apoyo a la decisión y los gemelos digitales son herramientas para ayudar en el proceso de toma de decisiones. Todas estas herramientas tienen sus fortalezas y debilidades, y áreas de aplicabilidad; los capítulos de este libro no son una escala de herramientas "malas" a herramientas "buenas", solo de manual, a digital fuera de línea, y luego digital en línea. Comprender el proceso de toma de decisiones, los indicadores clave de rendimiento mensurables y por qué se requiere una herramienta de análisis, y cuál es más útil es una habilidad crítica para la toma de decisiones efectiva en un contexto de fabricación. Sin entender exactamente qué preguntas se están haciendo y por qué, la herramienta de apoyo no podrá ofrecer toda su capacidad para ayudar a la empresa a responder esas preguntas.

Términos de acceso (Open Access) Este capítulo se distribuye bajo los términos de la Licencia Internacional Creative Commons Attribution 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso, duplicación, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o formato, siempre que dé el crédito apropiado al autor o autores originales y la fuente, se menciona y proporciona un enlace a la licencia Creative Commons y se indica cualquier cambio realizado.

Las imágenes u otro material de terceros en este capítulo están incluidos en la licencia Creative Commons del trabajo, a menos que se indique lo contrario en la línea de crédito de cada material; Si dicho material no está incluido en la licencia Creative Commons de la obra y la acción respectiva no está permitida por la normativa legal, los usuarios deberán obtener permiso del titular de la licencia para duplicar, adaptar o reproducir dicho material

6.7 Referencia

- [1] M. Grieves, "Virtually intelligent product systems: digital and physical twins," *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*, pp. 175-200, 2019.
- [2] B. Piascik, J. Vickers, D. Lowry, S. Scotti, J. Stewart and A. and Calomino, "Materials, structures, mechanical systems, and manufacturing roadmap," *NASA Technology Area 12-2*, 2012.
- [3] E. Negri, L. Fumagalli and M. and Macchi, "A review of the roles of digital twin in cps-based production systems," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 939-948, 2017.
- [4] M. Shafto, M. Conroy, R. Doyle, E. Glaessgen, C. Kemp, J. LeMoigne and L. and Wang, "Modeling, simulation, information technology & processing roadmap,," National Aeronautics and Space Administration, 2012.
- [5] B. Gockel, A. Tudor, M. Brandyberry, R. Penmetsa and E. and Tuegel, "Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles," *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, p. 1813, 2012.
- [6] R. Rosen, G. Von Wichert, G. Lo and K. and Bettenhausen, "About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 567-572, 2015.
- [7] T. Gabor, L. Belzner, M. Kiermeier, M. Beck and A. and Neitz, "A simulation-based architecture for smart cyber-physical systems," *2016 IEEE international conference on autonomic computing (ICAC)*, pp. 374-379, 2016.
- [8] A. Bolton, L. Butler, I. Dabson, M. Enzer, M. Evans, T. Fenemore, H. F. and e. al, "Gemini Principles," Centre for Digital Built Britain, 2018.
- [9] HBM, "Piezoelectric or Strain Gauge Based Force Transducers?," [Online]. Available: <https://www.hbm.com/en/3719/piezoelectric-or-strain-gauge-based-force-transducers/>. [Accessed 2020 11 23].
- [10] M. Groover, *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*, Pearson Education, 2016.
- [11] International Electrotechnical Commission, "ISO/IEC JTC 1 Information Technology - AG 11 Digital Twin," [Online]. Available: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:14:3438570860908::: FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:25023,25. [Accessed 23 11 2020].
- [12] International Organization for Standardization, "ISO/TC 184/SC 4 - Industrial Data," [Online]. Available: <https://www.iso.org/committee/54158.html>. [Accessed 23 11 2020].
- [13] International Organization for Standardization, "ISO/DIS 23247-1: Automation systems and integration — Digital Twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles," [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/75066.html>. [Accessed 23 11 2020].

- [14] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes and W. and Sihn, "Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification.," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016-1022, 2018.
- [15] High Value Manufacturing Catapult, Visualisation and VR Forum, "Feasibility of an Immersive Digital Twin," 2018.
- [16] M. Grieves and J. and Vickers, "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems," *Transdisciplinary perspectives on complex systems*, pp. 85-113, 2017.
- [17] Irdeto, "Irdeto Global Connected Industries Cybersecurity Survey," Amsterdam, 2019.
- [18] R. Millman, "Gartner: Four best practices for managing digital twins," 19 03 2018. [Online]. Available: <https://internetofbusiness.com/half-of-businesses-with-iot-projects-planning-to-use-digital-twin/>. [Accessed 23 11 2020].



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



"El apoyo de la Comisión Europea para la producción de esta publicación no constituye una aprobación del contenido que refleja únicamente las opiniones de los autores, y la Comisión no se hace responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en el mismo"

Sistema de formación en fabricación Digital para Pymes (Digit-T)
Referencia del proyecto: 2017-1-UK01-KA202-036807