

Capítulo 5

Modelado digital y simulación de sistemas de fabricación

Jack C Chaplin y Giovanna Martinez-Arellano

5.1 Introducción

Digital (adjetivo): que implica o relacionado con el uso de la tecnología informática.

Simulación (sustantivo): la producción de un modelo informático de algo, especialmente con el propósito de estudio.

- Oxford University Press

En el capítulo anterior, presentamos conceptos de análisis y modelado de sistemas de fabricación, centrándonos en el análisis de productividad y capacidad, seguido de modelado de cola para mejorar en un sistema más grande. Ambas técnicas requieren el uso de las matemáticas para evaluar los datos recopilados del sistema real. Sin embargo, el procesamiento matemático manual puede ser rápidamente extremadamente complejo para cualquier cosa que no sea los ejemplos más simples de sistemas de fabricación. Afortunadamente, el modelado y la simulación digital basados en computadora le permitirán obtener los conocimientos que necesita, al tiempo que simplifica significativamente el proceso.

Las herramientas de modelado y el software ayudan a los ingenieros a ser más productivos en el proceso de concepción, diseño, modelado, evaluación y planificación de la implementación de sistemas de fabricación. Modelar y simular

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

Instituto de Fabricación Avanzada, Universidad de Nottingham, Nottingham, Reino Unido

Correo electrónico: jack.chaplin@nottingham.ac.uk, giovanna.martinez@nottingham.ac.uk

© Los Autores 2020

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

los procesos de fabricación y la línea de producción más amplia permite utilizar la experiencia pasada para predecir el rendimiento y detectar problemas y mejorar la productividad en un modelo virtual antes del costoso proceso de implementación de un proceso de fabricación en el taller.

Las herramientas de modelado y simulación permiten a las empresas manufactureras probar cambios y mejoras en sus sistemas de fabricación antes de la implementación física. En muchos casos, las decisiones relativas a los cambios en el sistema de fabricación a menudo se basan en la experiencia y la intuición más que en la predicción cuantitativa. Aunque esto a menudo puede funcionar, se basa en la disponibilidad de experiencia humana y es propenso a errores.

La creación de herramientas de modelado y simulación es un campo altamente especializado, que requiere experiencia en probabilidad, estadística e informática científica. Afortunadamente, la amplia gama de soluciones comerciales significa que las empresas pueden aprovechar estas herramientas listas para usar. A pesar de esto, es importante comprender las técnicas subyacentes utilizadas por simulaciones y modelos, ya que influirá en cuál se aplica mejor a qué área. A menudo, se pueden requerir múltiples paquetes de simulación para darle cobertura de las áreas más detalladas de su sistema, como el rendimiento de la máquina, así como las áreas más grandes y estratégicas, como los niveles de stock.

Sin embargo, dando un paso atrás, primero discutiremos la captura de datos en la sección 5.2 Captura y análisis de datos . Como se explica en la sección 4.1, el propósito del análisis es transformar los datos en conocimiento. El modelado y la simulación son simplemente herramientas adicionales para el análisis, por lo que también existen para transformar los datos en conocimiento. Sin embargo, su capacidad para modelar con precisión sus sistemas de fabricación depende del acceso a datos precisos. Sin datos precisos, los conocimientos generados por los modelos y simulaciones tampoco serán precisos.

En la sección 5.2 Captura y análisis de datos se analiza todo el ciclo de procesamiento de datos, desde la recopilación de datos, pasando por el análisis y la toma de decisiones. A continuación, en la sección 5.3 Enfoques de modelado y simulación se analiza la gama de herramientas asistidas por ordenador disponibles para modelar y simular sistemas de fabricación, los precios y supuestos subyacentes, y las aplicaciones de ejemplo de su uso.

5.2 Captura y análisis de datos

5.2.1 El ciclo de procesamiento de datos

Datos (sustantivo): hechos y estadísticas recopilados juntos para referencia o análisis.

- Oxford University Press

A menudo se supone que el análisis de datos está tomando datos recopilados y ejecutándolos a través de una fórmula o modelo matemático para encontrar una

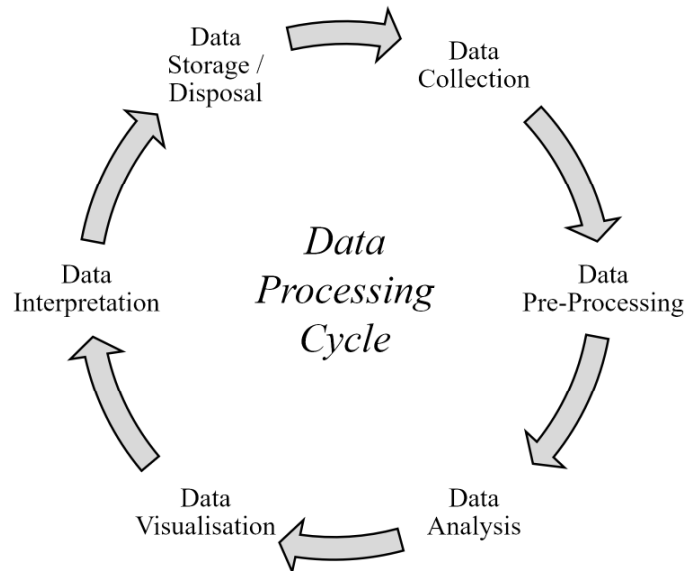


Figura 5.2-1 El ciclo de procesamiento de datos.

visión o resultado que le ayude a comprender mejor el tema del análisis. Y en primera instancia esto es cierto. Sin embargo, para un análisis de datos más complejo cuando los sistemas son más grandes, cambian y producen volúmenes de datos mucho más altos, hay pasos adicionales que deben considerarse para garantizar que el análisis sea preciso y útil.

El ciclo de procesamiento de datos es una serie de pasos para extraer información de los datos de una manera estructurada y organizada. Representa una serie de pasos desde la recopilación de datos hasta la eliminación de los mismos. Sin embargo, la información recopilada en el ciclo puede informar qué nuevos datos se requieren, convirtiéndolos de un proceso a un ciclo. Hay diferentes modelos de ciclo de vida disponibles en la literatura, dependiendo de la aplicación. Sin embargo, como se muestra en la Figura 5.2-1 los pasos generales son:

1. *Recopilación de datos*: Recopilación de datos de sensores o procesos de fabricación y centralización para su procesamiento.
2. *Preprocesamiento de datos*: Limpieza inicial y perfeccionamiento de los datos para resolver problemas que puedan impedir el proceso de análisis.
3. *Análisis de datos*: Uso de una variedad de técnicas y métodos para extraer patrones e información de datos y para encontrar información oculta.
4. *Visualización de datos*: Presentación de datos e información a los tomadores de decisiones para permitir una toma de decisiones efectiva.
5. *Interpretación de datos*: Entender correctamente la información presentada y tomar decisiones efectivas.

6. *Almacenamiento / eliminación de datos*: almacenar los datos o la información para futuras consultas, o determinar que ya no son útiles y desecharlos de forma segura.

Discutiremos las etapas del ciclo de procesamiento de datos en las próximas seis secciones.

5.2.2 Recopilación

La recopilación de datos es el primer paso en el ciclo de procesamiento de datos y es uno de los más críticos para el éxito del procesamiento. La calidad de los datos que se adquieren tendrá un impacto en la calidad del análisis y la toma de decisiones. Esto ha dado lugar a la frase común "basura en, basura fuera": un sistema de procesamiento de datos de alta calidad dará malos resultados si se dan malas entradas.

Los métodos de recopilación de datos a menudo se controlan de forma libre, lo que resulta en valores fuera de rango (por ejemplo, Volumen = 100), combinaciones de datos imposibles (por ejemplo, Acabado del producto = Acero sin pintar, Color de pintura = Verde), valores faltantes, etc. El análisis de datos que no se han examinado cuidadosamente para detectar tales problemas puede producir resultados engañosos. Normalmente, los datos recopilados pertenecen a uno de los siguientes tipos:

- *Datos estructurados*: datos que se han organizado en un repositorio con formato, normalmente una base de datos relacional. Generalmente organizado como una tabla en filas y columnas, y sus elementos asignados a campos específicos, datos estructurados es cómo las bases de datos almacenan los datos. Los campos tienen restricciones estrictas en los formatos que aceptan, como números dentro de un cierto rango, una opción de una lista de opciones o un valor booleano simple (sí / no). Los datos estructurados son generalmente los más fáciles de trabajar, ya que el significado de campos y números está bien definido y organizado.
- *Datos semiestructurados*: datos que no residen en una tabla estructurada pero que tienen algunas propiedades organizativas. Un correo electrónico, por ejemplo, tiene elementos estructurados como el destinatario, el remitente, la marca de tiempo, etc., pero también elementos no estructurados, como el cuerpo del mensaje o el contenido del archivo adjunto. XML es otro ejemplo de un formato semiestructurado con etiquetas que marcan el contenido, pero el contenido de las etiquetas no está estructurado.
- *Datos no estructurados*: datos que no están organizados de ninguna manera predefinida. Aunque el tipo de archivo puede tener algunos elementos estructurados, la gran mayoría de los datos no se ajusta a ninguna estructura estandarizada. Los archivos de audio, archivos de video, la mayoría de los formatos de texto y este capítulo del libro son todos ejemplos de datos no estructurados. Es más difícil trabajar con los datos no estructurados, pero el 80% de todos los datos recopilados no están estructurados.

- *Metadatos*: A diferencia de las clasificaciones anteriores, metadatos significa "datos sobre datos". Cualquiera de las tres formas de datos anteriores puede incluir metadatos. Por ejemplo, un documento de Word contiene metadatos sobre quién ha editado el documento, cuándo se editó por última vez, el tamaño del archivo y mucho más. Estos metadatos se pueden utilizar para ayudar a comprender a qué se relacionan los datos y la mejor manera de procesarlos.

La fuente de los datos influirá en el nivel de estructura de los datos. Hay tres tipos de fuente de datos generalmente considerados en los sistemas de fabricación:

- *Fuente primaria*: Las fuentes primarias son sensores, transformando los fenómenos físicos en señales eléctricas ya sea binarias, digitales o analógicas. Temperatura, humedad, presión, fuerza, movimiento, aceleración, luz y presencia de objetos son ejemplos de cosas que se pueden detectar y medir con sensores. Los sensores pueden venir integrados en equipos de fabricación, adaptados a equipos de fabricación existentes o pueden ser independientes. En la mayoría de los casos, una base de datos de fabricación no recibirá datos directamente de los sensores; los datos serán recibidos y procesados primero por un controlador industrial, PC industrial u otro dispositivo de adquisición de datos. Estos dispositivos son fuentes de datos *secundarias*.
- *Fuente secundaria*: Los dispositivos que reciben datos de fuentes primarias son fuentes de datos secundarias. Estos pueden incluir dispositivos como controladores lógicos programables (PLC), controladores de robots industriales, controladores de máquinas CNC, computadoras integradas, dispositivos de interfaz hombre-máquina y sensores inteligentes con capacidad de memoria y procesamiento integrada. La ventaja de tomar datos de fuentes secundarias en lugar de primarias es que las fuentes secundarias tienen capacidad computacional y memoria de almacenamiento. Esto permite convertir los datos del sensor de señales eléctricas sin procesar a estándares más fácilmente interpretados. Las señales también se pueden comprimir y preprocesar, lo que requiere menos espacio de almacenamiento en el almacén de datos. Los datos de múltiples sensores conectados a la misma fuente secundaria también se pueden combinar y comparar para obtener información adicional que un solo sensor puede no ser capaz de ofrecer.
- *Fuente externa*: No todos los datos relacionados con un producto y su fabricación y vida útil pueden originarse dentro de una sola empresa. Los datos de proceso de los proveedores que producen partes constituyentes se pueden centralizar a medida que el producto completo se une, lo que ayuda a comprender cómo la calidad del suministro puede afectar los resultados de calidad de la producción. El uso moderno de fuentes de datos externas sigue dependiendo en gran medida de soluciones basadas en papel, con piezas y materiales que llegan con documentación. Los sistemas de datos de fabricación altamente fragmentados y variables en toda la cadena de suministro hacen que la automatización de la adquisición de datos de fuentes externas sea un desafío.

Los datos recopilados de fuentes primarias, como los sensores, probablemente no estarán estructurados o semiestructurados, mientras que la potencia de cálculo de fuentes secundarias, como PLC o computadoras integradas, permite un enfoque más estructurado para los datos recopilados. A menudo es más fácil estructurar los datos más cerca de donde se recopilan que enviarlos todos a un único servidor para estructurarlos y agregarlos a una base de datos.

Los métodos de recopilación de datos dependerán del proceso de fabricación que desee analizar y de si los datos provienen de fuentes primarias o secundarias. La recopilación de datos no tiene que ser automática o en tiempo real, la recopilación periódica de datos y la presentación de informes sigue siendo útil, incluso cuando se realiza manualmente. La recopilación automática de datos en tiempo real tiene ventajas, y estas se discutirán en el Capítulo 6.

5.2.3 Procesamiento previo de datos

Ruido (sustantivo): fluctuaciones irregulares que acompañan a una señal eléctrica transmitida pero no forman parte de ella y tienden a oscurecerla.

- Oxford University Press

La conversión de datos a información es más difícil cuando los datos son ruidosos o poco fiables. También se ve obstaculizada cuando hay información irrelevante y redundante presente. Por esta razón, es necesario llevar a cabo el preprocesamiento de los datos para garantizar la calidad de los datos y la eficiencia del proceso de análisis. El preprocesamiento de datos incluye muchos pasos secundarios dependiendo del tipo de datos, y estos pasos se discuten en las siguientes siete subsecciones.

5.2.3.1 Limpieza de datos (datos faltantes)

Los datos pueden estar incompletos, lo que podría significar la falta de algunos valores que deberían haberse registrado, o la falta de ciertos atributos de interés durante algunos períodos de medición. Esto podría deberse a que los datos no siempre están disponibles (por ejemplo, un mal funcionamiento del equipo), a que el equipo no está configurado correctamente durante algunos períodos de medición o simplemente a que el atributo que ahora se considera importante no se consideraba que valía la pena medir en ese momento.

Por ejemplo, un sensor de fuente primaria registra la vibración en una máquina CNC. Estas lecturas son recogidas por un PLC de fuente secundaria, que agrega la marca de tiempo de la grabación y la velocidad del husillo que estaba usando la máquina CNC. Cada medición tiene tres atributos: vibración, marca de tiempo y velocidad del husillo. Estos datos se utilizan para el análisis de la relación entre la velocidad del husillo y la vibración.

Una conexión soldada estaba suelta en el sensor, y durante algunos períodos de alta vibración, el sensor no registró datos. Como resultado, la medición aleatoria ocasional en el conjunto de datos no tiene ningún valor para la vibración.

El CNC fue reparado y el PLC se restauró incorrectamente a una configuración anterior en la que la velocidad del husillo no se estaba incluyendo en los datos medidos. Como resultado, una hora sólida de mediciones no tiene ningún atributo de velocidad del husillo antes de que se detectara el error y se pudiera corregir.

Muchos métodos de análisis requieren datos homogéneos, es decir, datos en los que todos los valores a analizar tienen el mismo formato y atributos. Si los atributos se han omitido debido a un error o error, se pueden utilizar varios métodos:

- *Ignorar toda la medición:* es mejor usar solo como último recurso cuando se omitieron varios atributos o no hay forma de reconstruir los datos.
- *Complete el atributo faltante manualmente:* solo se puede usar si un trabajador humano puede predecir rápida y fácilmente cuál habría sido el valor faltante, como una marca de tiempo donde las mediciones se toman periódicamente.
- *Usar una constante global:* Defina un valor "predeterminado" para cualquier atributo faltante para rellenarlos automáticamente. Solo se puede usar para algunos tipos de datos que tienen un solo valor la mayor parte del tiempo.
- *Usar un valor promedio:* utilice un cálculo promedio para completar el valor, ya sea el promedio de las mediciones adyacentes, el promedio de todo el conjunto de datos o algún otro cálculo apropiado para los datos utilizados.

5.2.3.2 Limpieza de datos (ruido)

Los datos pueden ser ruidosos debido a que los instrumentos de recopilación están defectuosos o a que hay errores en la recopilación de datos. Sin embargo, la gran mayoría de las señales ruidosas son inevitables y son una realidad consistente incluso en los mejores equipos electrónicos. El ruido es un error aleatorio no deseado o varianza en un valor medido y oculta el valor verdadero.



Figura 5.2-2 Un ejemplo de una señal de medición del sensor con ruido (izquierda) y los mismos datos después de eliminar el ruido mediante suavizado (derecha).

Casi todos los dispositivos y circuitos electromagnéticos estarán sujetos a cierto grado de ruido, y el estudio y la caracterización del ruido es un dominio enorme por sí mismo. El ruido puede originarse en la fuente de alimentación de los sensores, circuitos incorrectamente conectados a tierra o las propiedades fundamentales de

los electrones, por nombrar solo algunos. Se pueden aplicar varias técnicas para suavizar el error, como:

- *Binning de datos*: Estos métodos implican la sustitución de valores con intervalos (“bins”) basados en los valores vecinos.
- *Agrupamiento en clúster*: Estas técnicas se utilizan para detectar valores inusuales o 'outliers' y eliminarlos.
- *Regresión*: Suavizar los datos ajustándolos a una función detectada automáticamente.
- *Filtrado*: Una variedad de funciones para eliminar ciertas frecuencias u otros componentes de la señal. Por ejemplo, la red eléctrica del Reino Unido tiene una señal de CA de 50 Hz, y esto a menudo causa ruido en las mediciones del sensor. Este componente de la señal se puede eliminar con un filtro.

5.2.3.3 Limpieza de datos (Inconsistencia)

Puede haber inconsistencias en los datos registrados para algunos procesos, especialmente cuando los datos se graban manualmente. Por ejemplo, cuando se registra manualmente información, diferentes operadores pueden tener convenciones de nomenclatura inconsistentes para los tipos de error. Incluso la recopilación de datos automatizada puede ser inconsistente cuando se configura con nombres de archivo o formatos de datos inconsistentes. Los datos también pueden duplicarse por error, ya sea debido a un error manual o un problema de red.

Estos problemas generalmente deben corregirse en la fuente, definiendo y aplicando convenciones y formatos de nomenclatura. Existen algunas herramientas automatizadas, como las herramientas de ingeniería del conocimiento, y pueden usarse para detectar la violación de restricciones de datos conocidas basadas en conocimientos previos y resaltar automáticamente las inconsistencias.

5.2.3.4 Integración de datos

Los datos pueden provenir de múltiples fuentes, incluidas bases de datos, hojas de cálculo, archivos XML, etc. y es posible que no siempre pueda definir los estándares de formato y representación de datos utilizados si los establece el equipo que está utilizando o provienen de fuentes externas. Combinarlos puede ser difícil si los datos están etiquetados o representados de manera diferente. La redundancia es otro problema. Un atributo puede ser redundante si se puede derivar de otro.

Aunque la solución más común a este problema es la integración manual, el uso de un almacén de datos y el método Extract, Transform, Load (ETL) puede simplificar este proceso, transformando todos los datos en un único formato homogéneo.

Un almacén de datos reúne muchas fuentes de datos diferentes y proporciona una única interfaz para todas ellas, lo que permite que las consultas se vean dentro de las muchas fuentes de datos sin esfuerzo adicional por parte del usuario. Las bases de datos son un ejemplo de un origen de datos en un almacén de datos. Los

almacenes de datos necesitan unificar e integrar múltiples orígenes de datos para permitir su búsqueda y comparación. Esto se logra con el proceso ETL.

Una base de datos normalmente se actualiza en tiempo real con los valores más recientes de los datos para permitir que las decisiones se tomen rápidamente. En comparación, un almacén de datos mantendrá todos los valores históricos de los datos. Por lo tanto, un almacén de datos es más lento de acceder y analizar, pero permite una visión más profunda de los datos que una base de datos.

Un *lago de datos* es otro término que se usa ocasionalmente. Mientras que un almacén de datos utiliza ETL para armonizar todos los datos en formatos compatibles, un *data lake* mantiene los datos en su forma original y solo los transforma en otros formatos a pedido. Este proceso a veces se llama Extract, Load, Transform o ELT.

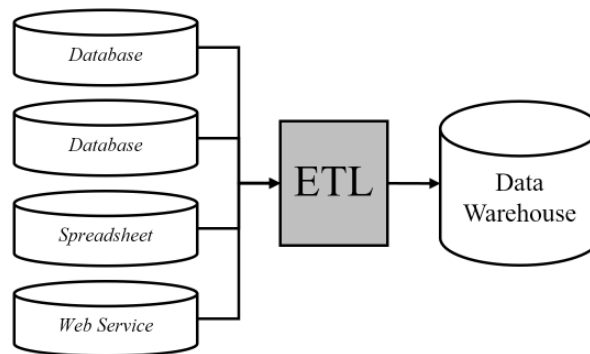


Figura 5.2-3 Los almacenes de datos combinan información actual e histórica de una amplia variedad de fuentes de datos utilizando un método denominado ETL.

ETL es un proceso a menudo complejo para extraer datos regularmente, transformarlos en un formato común y cargarlos en el almacén. Aunque es complejo, esto ahorrará tiempo a largo plazo cuando se almacenan grandes cantidades de datos.

5.2.3.5 Transformación de datos

Mientras que la integración de datos convierte un conjunto completo de datos de un formato a otro para su uso con diferentes programas sin cambiar los valores reales de los datos, la transformación de datos cambia los valores de los datos en sí en una forma más adecuada para el análisis. Las transformaciones requeridas dependerán del tipo de análisis, pero pueden incluir:

- *Normalización*: Cambiar la escala de valores de los datos para garantizar la compatibilidad. Esto a menudo significa usar un rango especificado como -1.0 a 1.0 o 0 a 1.0.
- *Agregación*: se refiere a la creación de operaciones de resumen o agregación de atributos, por ejemplo, calculando los montos mensuales o anuales de las ventas diarias en lugar de trabajar con valores diarios.

- *Generalización* de los datos: Los datos en bruto o de «nivel bajo» se sustituyen por conceptos de nivel superior. Por ejemplo, los atributos categóricos como la calle se pueden generalizar a conceptos de nivel superior como la ciudad o el condado. Del mismo modo, los valores numéricos como la edad se pueden asignar a categorías como jóvenes, de mediana edad y mayores para mover el enfoque de edades específicas a categorías.

Por ejemplo, una empresa desea comparar la calidad de las piezas fabricadas con diferentes centros de máquinas en el taller, para ver qué máquinas pueden necesitar mantenimiento o ajuste. Hay una variedad de centros de mecanizado de diferentes tamaños y edades para ser analizados. Los trabajadores han notado que el centro de mecanizado más nuevo produce más piezas que fallan los controles de calidad que cualquier otro y están preocupados por su inversión.

Críticamente, los únicos datos que los trabajadores están mirando es el número absoluto de piezas que fallan en el control de calidad. La nueva máquina produce más piezas en general que los otros centros de mecanizado. Si los datos de cada centro de mecanizado se pueden normalizar en un porcentaje de piezas fallidas en lugar del número absoluto, queda claro que la nueva máquina tiene un porcentaje menor de piezas rechazadas que cualquier otra, incluso si el número absoluto es mayor.

Tenga en cuenta que un proceso también llamado normalización es un aspecto importante del diseño de la base de datos, pero este proceso es distinto de la normalización de datos discutida aquí.

5.2.3.6 Reducción de datos

Reducir el volumen o las dimensiones (es decir, el número de atributos) de los datos. Esta técnica es útil cuando el análisis de datos en el conjunto de datos completo es inviable o poco práctico. Las técnicas de reducción de datos deben garantizar que la integridad de los datos originales no se vea comprometida, y produce un conjunto reducido que aún puede garantizar la extracción de conocimientos de calidad. Algunas estrategias incluyen:

- *Reducción* de dimensión: los atributos redundantes se pueden eliminar, ya sea manualmente o después de un período inicial de análisis.
- *Compresión* de datos: Los mecanismos de codificación se utilizan para reducir el tamaño del conjunto de datos. El tamaño puede ser un problema importante en algunas aplicaciones, por lo que es difícil o imposible de procesar dada la potencia de cálculo disponible.
- *Reducción* de numerosidad: Los datos se reemplazan o estiman por representaciones de datos alternativas y más pequeñas, como el uso de modelos de regresión o técnicas de agrupación en clústeres.
- *Discretización* y generación de jerarquía de conceptos: los valores de datos sin procesar para los atributos se sustituyen por rangos o niveles conceptuales

superiores. Por ejemplo, reemplazar valores numéricos con conceptos como bajo, medio y alto. Este es un concepto similar a la generalización para la transformación de datos.

Como ejemplo, considere monitorear las perturbaciones de la calidad de la energía. Para identificar efectivamente las causas del problema, uno necesita muestrear en el rango de MHz [1]. En comparación con otras aplicaciones donde los datos se recopilan a frecuencias inferiores a 25Hz, esto representa 40,000 veces más datos. En este caso se pueden aplicar técnicas como la Transformación Wavelet y el Análisis de Componentes Principales (PCA) para lograr una alta relación de reducción, en algunos casos por encima del 90%, dependiendo de la técnica utilizada [2].

5.2.3.7 Comentarios previos al procesamiento de datos

Una vez que los datos han sido preprocesados, el resultado de este proceso debe ser guardado. A menudo, un simple formato de valor separado por comas (CSV) es más que suficiente, y puede ser leído por todas las aplicaciones de hoja de cálculo y análisis. Si se trata de un formato de salida complicado, se pueden usar bases de datos, archivos XML o archivos JSON (entre muchos otros formatos). Estos formatos son estándares establecidos y casi todas las tecnologías que están disponibles hoy en día pueden entenderlos fácilmente.

Como puede verse por el tamaño de la sección de preprocesamiento de datos, es un área compleja y a menudo pasada por alto por aquellos menos familiarizados con el análisis de datos. Sin embargo, como muestra la siguiente tabla, el preprocesamiento de datos ocupa la mayor parte del tiempo de los científicos de datos profesionales, lo que muestra cuán importante pero también difícil es la tarea.

Nombre de tarea	Porcentaje de tiempo
Recopilación	19%
Procesamiento previo de datos	60%
Análisis de datos	9%
Algoritmos de análisis de refinación	4%
Conjuntos de entrenamiento de construcción	3%
Otro	5%

Tabla 5.2-1 La proporción de tiempo que los científicos dedican a las tareas [3]. La mayoría, con mucho, es el preprocesamiento de datos. El mismo estudio que recopiló estos datos también mostró que el preprocesamiento de datos es el aspecto menos agradable de ser un científico de datos.

5.2.4 Análisis de datos

Después de asegurarse de que los datos se limpian y en el formato y la estructura apropiados, están listos para el *análisis*. El análisis de datos moderno combina el análisis de datos estadísticos tradicionales con métodos computacionales nuevos y emergentes. El análisis utiliza una gran cantidad de técnicas, y muchas son específicas del tipo de datos que se procesan. Algunas de las categorías más grandes se discuten a continuación, a partir de un análisis altamente numérico y pasar a un análisis más textual:

- *Análisis estadístico*: El proceso de generar estadísticas a partir de datos almacenados y analizar los resultados para deducir o inferir significado sobre el conjunto de datos subyacente o la realidad que intenta describir. Algunas de estas estadísticas incluyen análisis bayesiano, probabilidad condicional, clasificación de datos, regresión lineal, remuestreo, contracción, análisis basado en árboles, por nombrar solo algunos [4]. Aunque los métodos avanzados de análisis de datos como el aprendizaje automático pueden ser muy efectivos, para muchos dominios, el análisis estadístico clásico bien ejecutado puede ser tan o más efectivo. El análisis estadístico puede no ser el método más moderno o moderno de análisis de datos para datos numéricos, pero las técnicas son bien entendidas y refinadas, y los resultados son a menudo extremadamente buenos para todas las circunstancias, excepto las más difíciles.
- *Análisis cuantitativo*: Técnicas que intentan comprender el comportamiento mediante el uso de modelos y mediciones matemáticas y estadísticas, para crear un modelo del proceso que se está midiendo. Este modelo permite a los analistas examinar y probar los eventos pasados, actuales y futuros anticipados.
- *Análisis cualitativo*: utiliza un juicio subjetivo basado en información no cuantificable, como la experiencia en gestión. Mientras que el análisis cuantitativo utiliza entradas exactas, el análisis cualitativo se ocupa de preocupaciones intangibles e inexactas que pertenecen al ámbito social y experiencial en lugar del matemático. El análisis cuantitativo y cualitativo a menudo se utilizan juntos para examinar las operaciones de una empresa y evaluar posibles inversiones.
- *Análisis semántico*: Este es el uso de ontologías para analizar contenido en fuentes basadas en texto. Las ontologías son modelos de datos de la denominación formal y definición de categorías, propiedades y relación entre conceptos, permitiendo a los sistemas automatizados comprender el significado aproximado del texto. Utiliza análisis de texto para medir la relación de diferentes conceptos ontológicos. Se puede utilizar para el procesamiento del lenguaje natural, es decir, comprender automáticamente el habla humana. Un ejemplo común de uso es entender si un tweet o reseña usa un lenguaje positivo o negativo sobre los productos.

Dos técnicas adicionales han surgido en los últimos años, y se utilizan solos o en combinación con las técnicas anteriores:

- *Minería de datos*: Este es el proceso de descubrir patrones en grandes conjuntos de datos (también llamados “big data”). Estos patrones se pueden ver como un resumen de los datos de entrada y se pueden utilizar en análisis y predicciones posteriores.
- *Aprendizaje automático*: explota los patrones que se encuentran en los datos históricos para identificar riesgos y oportunidades. Machine Learning se refiere al uso de algoritmos para aprender automáticamente de los datos, sin usar instrucciones explícitas o confiar en modelos.

5.2.4.1 Minería de datos

El conocimiento es un activo muy valioso en la fabricación, ya que permite a una empresa diferenciarse de sus competidores y competir de manera eficiente y efectiva lo mejor que pueda. Los avances en la tecnología de la información (TI), los sistemas de adquisición de datos y la tecnología de almacenamiento, así como los desarrollos en las herramientas de aprendizaje automático (ML) han llevado a nuevas formas de descubrimiento del conocimiento en los procesos de fabricación. Datos de casi todos los procesos de un negocio de fabricación como el diseño de productos y procesos, planificación y control de materiales, montaje, programación, mantenimiento, reciclaje, etc. se registran. Estos almacenes de datos ofrecen un enorme potencial como fuentes de nuevos conocimientos. Sin embargo, los datos deben analizarse y convertirse en conocimientos prácticos para ser útiles. Además, el volumen de datos recopilados se está convirtiendo en un problema con información enterrada en grandes volúmenes de otros datos.

La minería de datos es un área de inteligencia computacional que se centra en proporcionar nuevos sistemas, técnicas y teorías para el descubrimiento de conocimiento oculto en grandes volúmenes de datos. Es una mezcla de conceptos y algoritmos de estadística, inteligencia artificial y gestión de datos. El término *big data* también se usa comúnmente para referirse a esta área del análisis de datos.

El uso de la minería de datos en la fabricación comenzó en la década de 1990 y está ganando tracción en diferentes aspectos del proceso de fabricación, como el mantenimiento predictivo, la detección de fallas, el diseño, la producción, el aseguramiento de la calidad, la programación y los sistemas de soporte de decisiones. Un proceso de minería de datos típico se muestra en la Figura 5.2-4.

Se introdujeron metodologías de minería de datos para proporcionar una visión más holística del proceso de descubrimiento del conocimiento, más allá de la aplicación de algoritmos estadísticos o de aprendizaje automático. La minería de datos analiza un único conjunto de datos para descubrir patrones previamente desconocidos sin información previa, mientras que el aprendizaje automático utiliza la experiencia pasada para encontrar ejemplos de patrones conocidos en nuevos conjuntos de datos. Los dos dominios se cruzan con frecuencia, por lo que la distinción a menudo es borrosa.

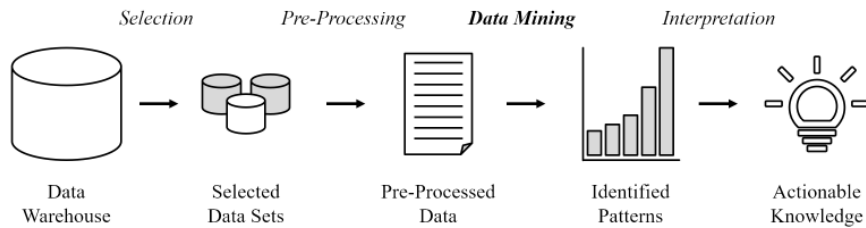


Figura 5.2-4 El proceso de minería de datos. Las fuentes de datos se seleccionan en el almacén de datos, se realizan algunos procesos previos y, a continuación, se identifican patrones en los datos. Estos patrones se convierten en conocimiento procesable.

5.2.4.2 Aprendizaje automático

El *aprendizaje automático* es un tema amplio, pero generalmente se refiere a algoritmos que aprenden con el tiempo para dar mejores resultados. El aprendizaje automático como término y como concepto se remonta a 1959, pero son las mejoras recientes en el poder computacional las que lo han llevado a la corriente principal. Los algoritmos de aprendizaje automático utilizan un conjunto de *datos de entrenamiento* que ha sido etiquetado y los utiliza para generar automáticamente un modelo predictivo. Este modelo se usa en un nuevo conjunto de datos y asigna una etiqueta automáticamente.

El aprendizaje automático ahora se usa comúnmente con aplicaciones que incluyen predicción de congestión en aplicaciones de navegación por satélite, filtrado de spam por correo electrónico, detección de fraude en transacciones bancarias y sistemas de reconocimiento facial. En cualquier lugar del dominio de fabricación donde exista el requisito de asignar una clase o tipo a un dato es una aplicación potencial del aprendizaje automático.

Por ejemplo, una empresa ha estado utilizando un sistema de visión para identificar defectos en el acabado de la pintura de sus productos. El sistema puede identificar algo fuera de lo común, pero no puede decir qué tipo de falla se ha detectado sin un trabajador para analizar la imagen. El trabajador recibe una imagen del defecto y le asigna una etiqueta. La etiqueta es el tipo de imperfecciones, y podría ser viruta, abrasión, abolladura, rasguño, burbujeo, o más. Conocer el tipo es importante ya que ayuda a identificar la causa del problema y evitar que vuelva a suceder. La empresa desea automatizar el proceso de etiquetado, ya que es un proceso que consume mucho tiempo y sus trabajadores podrían pasar su tiempo mejor en otros lugares.

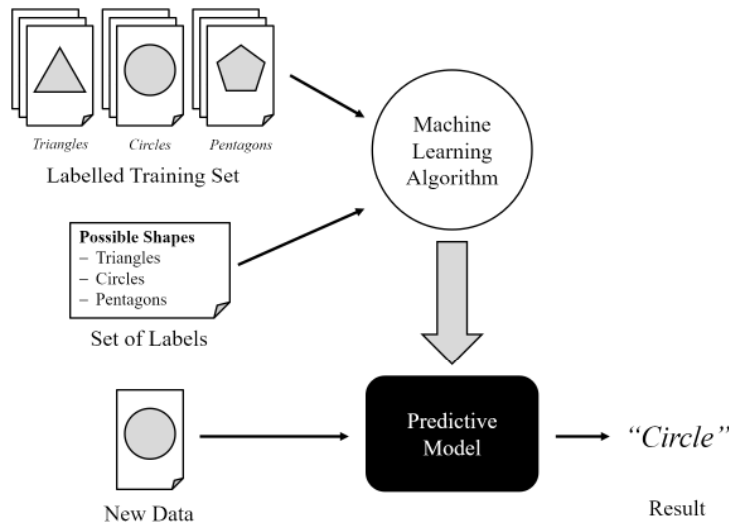


Figura 5.2-5 Una visión general del proceso de aprendizaje automático. El algoritmo utiliza un conjunto de formación de imágenes etiquetadas de formas (y un conjunto de todas las etiquetas posibles) para generar un modelo predictivo. Las futuras imágenes de formas sin etiquetar se clasificarán automáticamente, como el círculo representado.

Aquí, el conjunto de imágenes etiquetadas manualmente de imperfecciones se convierte en el conjunto de entrenamiento para el algoritmo de aprendizaje automático. El algoritmo crea un modelo predictivo a partir de este conjunto de entrenamiento. Cualquier imperfección futura que se identifique se ejecutará a través del algoritmo, y el algoritmo clasificará automáticamente el tipo de imperfección.

Sin embargo, el aprendizaje automático no está exento de inconvenientes. El aprendizaje automático requiere un gran conjunto de capacitación y el acceso a un conjunto de datos etiquetados suele ser el mayor obstáculo para implementar una solución de aprendizaje automático. La calidad de los resultados también depende en gran medida de la calidad del conjunto de formación. Considere el ejemplo en Figura 5.2-5 – ¿y si los nuevos datos fueran una imagen de un octágono? El modelo predictivo probablemente lo clasificaría como un círculo ya que no tiene ejemplos de octágonos para usar, y un círculo sería el mejor ajuste de las etiquetas disponibles. Sin embargo, los algoritmos pueden establecer un nivel de certeza en su clasificación para marcar problemas como este. Un último problema es que el modelo predictivo es una "caja negra": se generó automáticamente y la forma en que funciona un modelo específico es extremadamente compleja y casi siempre

incognoscible para un humano. Esto significa que un modelo que tiene problemas se vuelve muy difícil de solucionar.

Tanto la minería de datos como el aprendizaje automático son posibles con algoritmos extremadamente complejos, pero saber exactamente cómo funcionan no es necesario para comenzar a implementarlos, ya que existen muchos paquetes de software que manejan la complejidad. La opción principal sería entre paquetes gratuitos de código abierto como TensorFlow de Google, PyTorch de Facebook, Keras y Weka; o utilizar soluciones integradas patentadas como las disponibles en Amazon Web Services, Microsoft Azure o Google Cloud.

5.2.4.3 Análisis de datos

También hay que destacar el campo de *Data Analytics*. Mientras que el análisis se centra principalmente con los datos del pasado y entender por qué ocurren los eventos, el análisis se centra en lo que es probable que ocurra en el futuro y cómo responder a ella. El análisis de datos también se denomina *Business Analytics* cuando se aplica a aspectos más generales del rendimiento empresarial. El análisis generalmente se define como tener tres tipos:

- Análisis *descriptivo*: ¿Qué pasó? Esto es efectivamente un análisis y se centra en lo que sucedió en el pasado.
- Análisis *predictivo*: ¿Qué pasará? El uso de modelos predictivos como el aprendizaje automático y algunas técnicas estadísticas para predecir lo que es probable que ocurra en el futuro en base a eventos anteriores.
- Análisis *prescriptivo*: ¿Cómo podemos hacer que las cosas sucedan? Al comprender qué eventos o parámetros contribuyeron a eventos pasados, recomiende automáticamente cambios en los parámetros para influir en eventos futuros.

Existen muchos paquetes de software o lenguajes de programación para el análisis y análisis de datos, con ejemplos gratuitos de código abierto que incluyen KNIME (Konstanz Information Miner) para análisis de datos, R que es un lenguaje de programación de análisis de datos dedicado y SciPy que es una biblioteca de análisis de datos para Python. También existen muchos paquetes de software comercial, a menudo descritos como software de *Business Intelligence*.

5.2.5 Visualización de datos

El análisis de datos a menudo se lleva a cabo en paralelo con la *visualización de datos*, y de hecho muchas herramientas de análisis y análisis de datos incluirán capacidades de visualización de datos. Su finalidad es mostrar de forma gráfica y fácilmente entendida, las tendencias y la estructura de la información que se ha descubierto a través del proceso de análisis. Se pueden llevar a cabo relaciones y patrones amplios, al igual que las tendencias emergentes. La visualización también ayuda a reducir rápidamente la búsqueda de información de interés. Puede ser

estático, en forma de gráficos y diagramas en informes, o en vivo, como paneles de fabricación que informan datos en vivo desde el taller.

Ejemplos comunes de software de visualización 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. Incluso las funciones de informes y gráficos del software de hoja de cálculo pueden lograr estos objetivos.

La visualización de datos es un ejemplo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones basado en datos. Los sistemas de apoyo a las decisiones se analizarán más en el Capítulo 6.

5.2.6 Interpretación de datos

Aunque existen herramientas automatizadas para ayudar a tomar decisiones, la interpretación final y la responsabilidad de tomar decisiones aún suelen recaer en los humanos. El ciclo de procesamiento de datos existe para facilitar el proceso de toma de decisiones, pero la decisión en sí debe estar en línea con los procedimientos establecidos por la empresa.

Es importante cuando se toma una decisión comprender el tipo de problema que realmente se está resolviendo, ya que esto influirá en cuánto y qué tipo de datos se requieren para tomar una buena decisión.

- *Problemas no estructurados*: Estos poseen múltiples soluciones y no existe un algoritmo o fórmula que pueda conducir a la solución óptima debido a las incertidumbres en el problema, y hay pocos parámetros que pueden verse directamente afectados para resolver el problema. Los problemas no estructurados a menudo son raros o novedosos, y no tienen respuestas establecidas. Un ejemplo sería una decisión sobre los esquemas de recompensa de los empleados donde los resultados de la decisión son más sobre la satisfacción de los empleados y la percepción de la empresa en lugar del valor exacto de la recompensa. Los problemas no estructurados generalmente se resuelven con decisiones intuitivas informales basadas en la experiencia.
- *Problemas estructurados*: Por el contrario, los problemas estructurados tienen parámetros y objetivos muy claros, y los resultados de una decisión son posibles de modelar y predecir. A menudo hay un pequeño número de criterios para maximizar, y existen algoritmos para modelar la decisión. Los problemas estructurados a menudo son rutinarios y bien entendidos. Un ejemplo sería la respuesta a un requisito de mantenimiento común para una pieza de equipo o máquina herramienta. El problema es común y bien entendido, y la experiencia muestra cuál es la mejor solución. Se entienden los costos de las piezas de repuesto y el tiempo de inactividad.
- *Problemas semiestructurados*: Estos son problemas en los que solo una parte del problema puede resolverse de manera óptima, lo que requiere una combinación de una solución estándar y un juicio individual. Son el área gris entre

estructurado y no estructurado. Un ejemplo sería crear un plan de mantenimiento para una nueva pieza de equipo. Usted conoce el costo del tiempo de inactividad y las piezas de repuesto, pero no tiene una comprensión intuitiva de la frecuencia con la que la máquina necesitará mantenimiento hasta que haya estado en uso durante un tiempo considerable. Los modos de falla no se entienden completamente.

Cuanto más estructurado sea un problema, más fácil será aplicar datos y encontrar una solución óptima. Hasta ahora, los métodos que hemos estado discutiendo se aplican mejor a problemas estructurados y semiestructurados. Los problemas no estructurados también son más difíciles de adoptar un enfoque basado en datos, pero eso no significa que sea imposible. Muchos problemas no estructurados pueden reducirse a uno semiestructurado tras un análisis más detallado, y herramientas como los modelos de análisis de decisiones (DAM) pueden comenzar a descomponer el problema en componentes más pequeños y manejables. 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.

Hay dos problemas comunes a la hora de tomar decisiones asistidas con los datos analizados:

- Los tomadores de decisiones toman malas decisiones porque no tienen acceso a datos de alta calidad, y o bien están mal informados por datos malos o en su lugar utilizan la intuición o la intuición.
- Los científicos de datos intentan tomar decisiones basadas en datos, cuando no tienen una comprensión detallada del mundo real en el que se originan los datos.

La solución simple es garantizar que los científicos de datos y aquellos con conocimientos de dominio trabajen juntos en el proceso de toma de decisiones. La realización de todos los pasos del ciclo de análisis de datos proporcionará un conjunto sólido y fiable de datos analizados y visualizados en los que basar las decisiones, pero esto también debe combinarse con la experiencia del mundo real.

5.2.7 Almacenamiento y eliminación de datos

Para los datos recopilados, procesados y analizados, esta etapa del ciclo representa una bifurcación. Los datos se pueden almacenar y devolver a la etapa de recopilación de datos del ciclo para su uso y análisis futuros a medida que se adquieren nuevos datos. Como la cantidad de datos que se pueden generar para la producción de un solo artículo fabricado puede ser del orden de gigabytes por día, existe la necesidad de una base de datos que sea capaz de almacenar estos datos. Aunque el costo absoluto del almacenamiento de datos sigue disminuyendo (especialmente cuando se consideran soluciones basadas en la nube), la cantidad de

datos que se generan sigue aumentando y la velocidad a la que se pueden enviar y acceder a los datos no aumenta a la misma velocidad.

Alternativamente, se puede considerar que los datos han cumplido su propósito y ser eliminados. Los datos pueden ocupar un gran volumen de espacio de almacenamiento, y el almacenamiento permanente es un esfuerzo costoso. Aunque los costos de almacenamiento están disminuyendo, los volúmenes de datos recopilados por las empresas también están aumentando. Una alternativa es eliminar los datos brutos recopilados, manteniendo los datos analizados. Los datos analizados normalmente requieren una menor cantidad de espacio de almacenamiento, por lo que puede conservar los conocimientos incluso si desecha el origen de los conocimientos.

Al deshacerse de los datos, considere qué tan bien se borran los datos. Es posible que la eliminación simple de archivos no elimine los datos del medio de almacenamiento. Esto puede no ser una gran preocupación para los datos de proceso recopilados, pero los datos que son comercial o personalmente sensibles deben eliminarse de forma segura o podrían ser recuperados por un individuo malicioso, como un rival corporativo o un ex empleado descontento. Tenga en cuenta también sus responsabilidades bajo el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) en la UE o regulaciones locales equivalentes: los datos personales deben recopilarse solo cuando sea necesario, usarse para un propósito claro y específico, y eliminarse de forma segura cuando ya no sea necesario.

5.3 Enfoques de modelado y simulación

5.3.1 Introducción al modelado y la simulación

Un modelo es una representación matemática (y a menudo una simplificación) de un sistema construido con matemáticas. Una simulación utiliza el modelo para predecir el comportamiento del sistema bajo parámetros especificados, introduciendo valores en el modelo y registrando los resultados. Las herramientas de modelado y simulación permiten a las empresas de fabricación probar cambios y mejoras en sus sistemas de fabricación antes de la implementación física. En muchos casos, las decisiones relativas a los cambios en el sistema de fabricación a menudo se basan en la experiencia y la intuición más que en la predicción cuantitativa. Aunque esto a menudo puede funcionar, se basa en la disponibilidad de experiencia humana y es propenso a errores.

La creación de un paquete de modelado o simulación requiere conocimientos y experiencia extremadamente especializados. Aunque estas herramientas ocultarán muchos de estos detalles de su implementación al usuario, comprender el tipo de modelo subyacente ayudará a comprender qué paquete se aplica mejor a sus necesidades. Las herramientas de modelado tienden a especializarse en áreas específicas, y a menudo se requerirá una combinación de paquetes para obtener una buena cobertura de los problemas que desea resolver.

Para la fabricación, estas áreas especializadas se pueden agrupar ampliamente en tres dominios, y a menudo es el caso de que necesite un paquete o solución separados para cada dominio como mínimo:

- El *dominio del producto* está relacionado con el producto que se va a fabricar y se puede clasificar en modelos orientados a estructuras, geometrías, características u orientados al conocimiento.
- El *dominio del proceso* representa las relaciones entre eventos y actividades en un sistema de fabricación, describiendo cómo debe actuar un sistema de fabricación en su conjunto, sin entrar en los detalles específicos de cada máquina de fabricación y recurso.
- El *dominio de recursos* representa las instrucciones operativas para un recurso de fabricación determinado, como un centro de mecanizado o un robot. Estas instrucciones suelen ser específicas del recurso que se modela, como el código G de una máquina CNC.

La siguiente sección ofrece una visión general de los enfoques de modelado más comunes utilizados por los paquetes software, y detalla su aplicabilidad para ayudarle a evaluar un paquete para sus necesidades.

5.3.2 Tipos de enfoques de modelado

5.3.2.1 Simulación de eventos discretos

Simulación de eventos discretos (Discrete element simulation, DES) es una metodología de simulación que se ha adoptado ampliamente dentro de las industrias para probar los cambios del sistema de fabricación virtualmente antes de implementarlos físicamente. Permite un análisis de alto nivel del rendimiento del sistema mediante la reproducción estadística y probabilística de las interacciones de sus componentes y recursos.

Toda la planta de fabricación puede modelarse como una secuencia de operaciones que se realizan en entidades pasivas (por ejemplo, componentes), a medida que pasan por las secuencias de procesamiento. Aunque los componentes son pasivos, tienen atributos que afectan a la forma en que se manejan y algunos de estos atributos cambian a medida que el componente avanza a través del proceso. La simulación le permite probar los cambios en su línea de producción y responde preguntas como:

- ¿Cuánto tiempo durará el tiempo de ciclo para este nuevo producto?
- ¿Cuál es la utilización de los equipos, necesito invertir en más de algunos recursos u optimizar la utilización de otros?
- ¿Es probable que mis búferes se llenen y se formen colas en el proceso?
- ¿Cuál es la tasa de error prevista de este proceso y es el costo efectivo del proceso?

Usted puede notar que muchas de las preguntas anteriores son similares a las contestadas en el Capítulo 4, y eso no es una coincidencia. DES es una simulación estadística en lugar de una física. Permite la inclusión de datos existentes de sus recursos (por ejemplo, cuál es el tiempo de ciclo de un proceso, con qué frecuencia requiere mantenimiento una máquina y con qué frecuencia falla) para predecir el rendimiento futuro en diferentes circunstancias. A menudo es fácil de implementar dentro de una empresa, siempre que tenga datos históricos en los que basar predicciones.

5.3.2.2 Modelado basado en agentes

El *modelado basado en agentes* es una herramienta que permite el modelado y la simulación de sistemas complejos dividiendo el problema en unidades más simples y modelando aquellos que utilizan agentes inteligentes. De esta manera, el modelador solo necesita comprender el comportamiento de los componentes simples para crear el modelo, mientras que técnicas como la dinámica del sistema requieren una mejor comprensión del sistema en su conjunto.

Un *agente inteligente* (típicamente simplemente llamado un *agente*) es una pieza de software independiente es capaz de exhibir un comportamiento autónomo e inteligente [5]. Un agente es un solucionador de problemas individual con cierta capacidad de detectar y actuar sobre el medio ambiente. Se pueden utilizar tanto para el control de sistemas (donde el entorno es el sistema físico) como para sistemas de modelado (donde el entorno es un modelo). Nos centramos aquí en la aplicación a los sistemas de modelado.

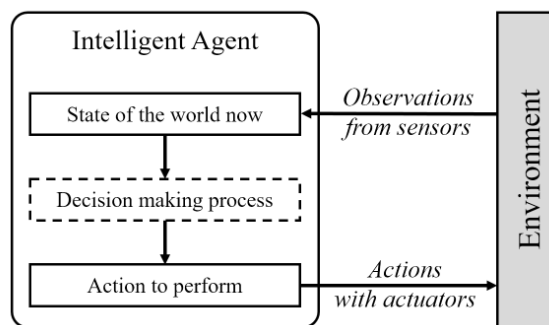


Figura 5.3-1 La función básica de un agente. El proceso de toma de decisiones puede variar desde simples reglas de condición-acción hasta procesos de aprendizaje artificialmente inteligentes altamente complejos.

Hay muchos tipos de agentes, pero tienen algunas propiedades básicas:

- Un agente puede observar su entorno con sensores.
- Un agente toma una decisión basada en las observaciones.

- Un agente inicia y ejecuta acciones utilizando actuadores para cambiar el entorno.

El modelado basado en agentes desglosa problemas complejos centrándose en componentes más simples, con cada agente representando el comportamiento de un recurso o trabajador en el sistema. La complejidad surge entonces de las interacciones de estos componentes, cada uno representado por un agente. Para el modelado y la simulación, el entorno, los sensores y los actuadores serían virtuales. Sin embargo, los agentes se utilizan cada vez más como método de control para sistemas físicos reales, por lo que la definición básica omite "virtual".

En la fabricación, esta herramienta se ha utilizado típicamente para modelar la planificación de la producción y la asignación de recursos, la programación y el control de la producción, el monitoreo y el diagnóstico, la producción en redes y la gestión del montaje y el ciclo de vida. Debido a su naturaleza distribuida, los sistemas basados en agentes proporcionan modularidad, robustez y autonomía, lo que ofrece una forma alternativa de diseñar y controlar los sistemas en comparación con los enfoques convencionales. Un ejemplo de entorno existente para la simulación de sistemas multiagente en el ámbito de fabricación es MAST (Manufacturing Agent Simulation Tool) [6], desarrollado por Rockwell Automation. Esta herramienta se centra particularmente en el enrutamiento dinámico de productos.

5.3.2.3 Dinámica del sistema

La *dinámica del sistema* es una técnica para construir modelos que se centran en las interdependencias, los efectos de retroalimentación, las dependencias de tiempo y la causalidad en el objeto que se está representando. Permite un modelado más complejo que el DES, y se aplica más allá de la fabricación en ámbitos como las finanzas, el crecimiento de la población, la agricultura y el comportamiento ecológico. Los bucles de retroalimentación son una de las consideraciones clave en la dinámica del sistema, y causan algunos de los comportamientos menos predecibles en sistemas complejos como líneas de producción e instalaciones, y pueden causar problemas graves si no se entienden [7].

La orientación del sistema de la dinámica del sistema lo hace ideal para el análisis de futuras dinámicas de producción, y puede incluir aspectos operativos y organizativos además de elementos de planta. Permite estudiar cómo el flujo de información afecta el comportamiento de los sistemas productivos, aspecto a menudo no cubierto en otras simulaciones, que solo consideran el flujo de objetos físicos. Un modelo de dinámica de sistema típico se construye utilizando los siguientes elementos:

- Los *niveles* (mostrados como rectángulos) representan la cantidad de algún elemento del sistema en un punto en el tiempo, como los niveles de stock.

- Las *tasas* o *variables de flujo* (mostradas como válvulas) representan la velocidad de los niveles de cambio en el sistema en un intervalo de tiempo, como la utilización de refrigerante.
- Los *convertidores* (mostrados como círculos) son ecuaciones o cálculos adicionales que afectan al sistema.
- Los *conectores* (mostrados como flechas) son los enlaces de información en el sistema que conectan otros componentes entre sí. Las flechas a menudo reciben diferentes pesos para mostrar la diferencia entre la información (flechas delgadas) y el cambio de cantidades físicas (flechas gruesas).
- Los *límites del sistema* (mostrados como nubes) son los bordes del sistema que se está modelando.

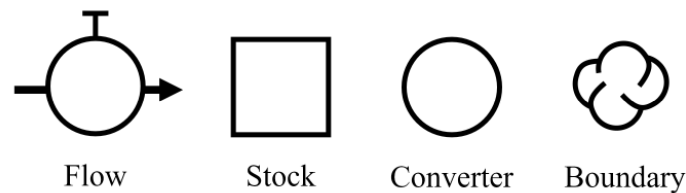


Figura 5.3-2 Componentes del diagrama de dinámica de sistemas. Derechos de la imagen del autor. Adaptado de [8].

Dependiendo del problema que se esté modelando, la dinámica del sistema se puede implementar en dos fases:

1. *Dinámica cualitativa del sistema:* Esta fase implica la creación de diagramas de causa y efecto o mapas del sistema.
2. *Dinámica cuantitativa del sistema:* Esta fase implica derivar la forma de las relaciones entre todas las variables dentro de los diagramas, la calibración de parámetros y la construcción de ecuaciones y experimentos de simulación.

Uno de los diagramas más comunes en la dinámica del sistema es el diagrama de niveles y velocidades (también conocido como el diagrama de stock y flujo). Figura 5.3-3 muestra un ejemplo.

Una vez que el sistema se define con la dinámica del sistema, se utiliza una evaluación detallada para encontrar la solución ideal. Se requieren grandes cantidades de datos en esta etapa, lo que hace que esta evaluación sea un desafío para algunas empresas manufactureras. En general, la dinámica de sistemas también es una simulación más compleja de crear que DES, pero ofrece muchas más posibilidades para comprender sistemas altamente complejos.

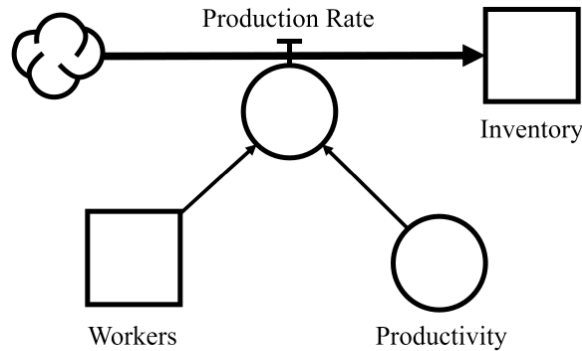


Figura 5.3-3 Ejemplo de un diagrama de niveles y tarifas, que modela la tasa de producción de una línea de producción como dependiente de la cantidad de trabajadores disponibles y la productividad del sistema, lo que resulta en la adición de productos terminados al inventario. Derechos de la imagen del autor. Adaptado de [8].

5.3.2.4 Redes de Petri

Las redes *Petri* son una herramienta de modelado gráfico y matemático aplicable a varios sistemas. Como herramienta gráfica, las redes Petri se han utilizado como una ayuda de comunicación visual similar a los diagramas de flujo o diagramas de red. La red Petri clásica es un gráfico dirigido con dos tipos de nodos llamados *lugares* y *transiciones*. Los lugares están representados por círculos y transiciones por rectángulos. Una red Petri tiene estados, representados por *tokens*. Los lugares pueden contener cero o más tokens, que están representados por puntos negros. Una transición se activa solo si todos los lugares que son entradas a las transiciones tienen tokens, y una transición consumirá los tokens de entrada y moverá los tokens a los lugares de salida.

Figura 5.3-4 muestra una red Petri que modela una máquina que procesa trabajos y tiene dos estados: libre y ocupado. Hay cuatro lugares, *Almacenamiento* (1), *Disponible* (4), *Procesamiento* (2) y *Completo* (3), y hay dos transiciones, inicio del proceso y finalización del proceso. Hay cinco fichas, 4 en el lugar de *almacenamiento* y 1 en el lugar *disponible*. Los tokens en el *almacenamiento* representan partes que se van a procesar, y el token *disponible* representa la disponibilidad del torno para el procesamiento. El sistema procede en pasos de tiempo discretos.

La transición que representa el proceso solo puede activarse si hay un token en *almacenamiento* (que representa la parte a procesar) y un token *disponible* (lo que indica que el proceso no está ocupado). La transición consumirá estos tokens y colocará un token en el *procesamiento*. El proceso no puede comenzar de nuevo ya que, aunque hay piezas disponibles en *almacenamiento*, el torno no está disponible.

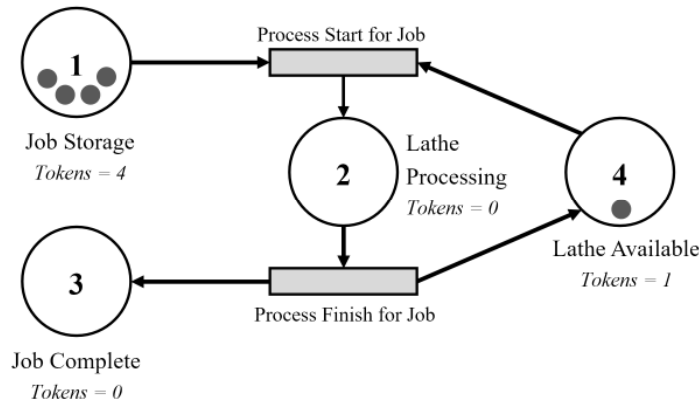


Figura 5.3-4 Modelado en red de Petri una máquina con dos estados: procesamiento y disponibilidad.

La transición que representa el final del proceso consumirá un token disponible en el *procesamiento* y colocará un token en *completo* (que representa un trabajo terminado) y en *disponible* (que representa el torno está disponible nuevamente). La red Petri está lista para comenzar un nuevo trabajo tomando un token del *almacenamiento* y se repetirá hasta que se procesen todas las piezas.

Las redes Petri son un método de modelado potente pero difícil y detallado. A menudo son el modelo subyacente para un software de modelado más fácil de usar, y muchas herramientas de modelado se encargarán del modelado de nivel inferior para usted.

5.3.2.5 Simulación de Monte Carlo

La *simulación de Monte Carlo* es un proceso analítico computarizado que se utiliza para evaluar y medir el riesgo asociado con cualquier empresa o proyecto dado. Permite a los usuarios comprender una situación dada, pero también el impacto de otros escenarios posibles. En lugar de utilizar valores absolutos para una simulación (por ejemplo, un tiempo de ejecución promedio para un proceso de fresado), utiliza una distribución de probabilidad de valores.

Un ejemplo de esta distribución de probabilidad es la distribución Normal. Durante la simulación, las muestras se extraen aleatoriamente de los rangos de entrada y los resultados se recalculan una y otra vez. El resultado es un rango, o distribución, de los posibles valores de resultado y sus probabilidades asociadas de ocurrencia. En comparación con los métodos deterministas, MCS ofrece las siguientes ventajas:

- Proporciona *estimaciones probabilísticas de resultados potenciales*, en lugar de valores individuales. Por ejemplo, una simulación convencional puede

informarle de un tiempo de proceso estimado que sea aceptable para usted. En comparación, un MCS le informará las probabilidades de que el tiempo del proceso caiga fuera de las bandas aceptables.

- Proporciona información de qué *entradas contribuyeron más a un resultado particular*. Las desviaciones en un proceso pueden tener poco o ningún impacto en el rendimiento general del sistema, pero un proceso diferente puede tener un gran efecto incluso con pequeñas desviaciones.
- Permite al usuario *comprender el comportamiento* de las entradas relacionadas con un escenario resultante particular. ¿Qué combinación potencial de variables puede causar que su sistema tenga problemas? ¿Cómo puedes protegerte contra esto?

Un ejemplo del uso de MCS en las empresas de fabricación es para minimizar el número de interrupciones causadas por la cadena de suministro. Mediante este tipo de simulación, se pueden modelar variables como demandas de ventas, costos de material, gastos de inversión, tiempos de entrega y procesamiento, incertidumbre de inventario y riesgo de desastre, y considerar variables independientes e interrelacionadas. Cuando se ejecuta el MCS, el usuario puede considerar miles de escenarios y determinar varios resultados, como qué factores tienen más probabilidades de impactar en la cadena de suministro; clima, costos de materiales, gastos generales, precios fluctuantes, por nombrar solo algunos.

5.3.2.6 Simulación virtual

Muchos métodos de modelado ahora tienen capacidad de representación tridimensional, lo que permite al usuario ver los resultados de una simulación de una manera realista e intuitiva comprensible. Avanzado en tecnologías de realidad virtual y realidad aumentada puede incluso presentar al usuario el sistema de una manera inmersiva e interactiva.

Sin embargo, en algunos casos, la creación de un modelo 3D para obtener una idea intuitiva de un diseño o sistema es suficiente para lograr los objetivos del proceso de modelado. Los ejemplos incluyen modelos de diseño asistido por ordenador (CAD) de productos para probar la facilidad de uso (aunque CAD ofrece mucho más también), y la creación de modelos de estaciones de montaje o áreas de trabajo para que los trabajadores tienen una idea de la ergonomía y comprobar si hay problemas antes de la estación de trabajo se construye.

5.3.2.7 Juegos de simulación

Un modelo es una abstracción matemática de un sistema, y el enfoque habitual es utilizar el modelo para simular el resultado de parámetros especificados, o para optimizar los parámetros para los resultados deseados. A veces, sin embargo, el modelo se utiliza para probar cómo los humanos reaccionarán a la situación. Esto se llama juego de simulación y permite probar las respuestas humanas a situaciones inesperadas o estresantes, como la gestión de incidentes, o para probar la usabilidad de interfaces y estaciones de trabajo.

5.3.2.8 Simulación inteligente

El modelado y las simulaciones pueden ser extremadamente complejas. Estos sistemas a menudo tienen muchos parámetros y para explorar todas las posibilidades puede requerir tiempos de ejecución inviablemente largos, proporcionando respuestas demasiado tarde para ser útiles. La *simulación inteligente* se basa en técnicas de Inteligencia Artificial (IA) y normalmente admite otros tipos de técnicas de simulación. Por ejemplo, el aprendizaje automático y el muestreo inteligente se pueden utilizar para las tareas de optimización y calibración de un sistema basado en agentes, creando metamodelos que pueden ofrecer aumentos de velocidad dramáticos para modelos a gran escala. En el caso de los sistemas de análisis digitales gemelos y qué pasaría si, los componentes de IA se pueden integrar directamente en el modelo de simulación para permitir pruebas y pronósticos.

Otra aplicación de Simulación Inteligente es el uso de aprendizaje profundo para la sustitución de sistemas basados en reglas. PricewaterhouseCoopers, por ejemplo, actualmente apoya a un gran fabricante de automóviles para introducir vehículos autónomos para el público. Parte de este trabajo implica el uso de aprendizaje de refuerzo profundo para determinar reglas de decisión óptimas que permitan a los vehículos maximizar la eficiencia y satisfacer la demanda de viaje del cliente. Enfoques similares se pueden utilizar para líneas de fabricación automatizadas.

5.3.2.9 Simulación distribuida

Cuando un modelo es tan complejo ejecutar una simulación llevaría mucho tiempo, se puede usar una simulación distribuida. Se pueden usar muchos métodos de modelado subyacentes, el desafío aquí es hacer que el modelo se descomponga en unidades más pequeñas que luego se puedan distribuir a múltiples recursos informáticos para ejecutar la simulación en paralelo.

Otro caso de uso para la simulación distribuida es donde varias entidades (como las empresas) desean crear un modelo y ejecutar una simulación juntas, pero también desean crear sus modelos utilizando diferentes paquetes de modelado, o desean mantener los elementos de su modelo en secreto. Muchos de los estándares en simulación distribuida como IEEE 1278 [9] tienen su origen en los juegos de guerra militares, que requerían la distribución de la simulación con elementos mantenidos en secreto.

5.3.3 Aplicaciones de modelado

El modelado tiene una amplia gama de aplicaciones en la fabricación. Quizás el más comúnmente utilizado es CAD - Diseño asistido por ordenador. CAD permite construir un modelo de un diseño propuesto, y prácticamente probado antes de realizar prototipos. Permite el análisis dimensional y la validación, así como el análisis de ingeniería como:

- *Análisis de propiedades de masa*, como el volumen del producto, las superficies, el peso y el centro de gravedad.

- *La comprobación de interferencia* en diseños de varios componentes, la comprobación de componentes no chocará físicamente.
- *Análisis de tolerancia* para determinar automáticamente qué tolerancias son necesarias para el correcto funcionamiento del producto.
- *El análisis de elementos finitos* proporciona soluciones aproximadas para pruebas como la tensión-deformación, la transferencia de calor o el flujo de fluidos que de otro modo requerirían prototipos físicos.
- *El análisis cinemático y dinámico* ayuda a probar el movimiento de múltiples componentes vinculados y analiza sus propiedades de movimiento.

Además de esto, los servicios de calidad de vida, como revisiones de diseño automatizadas, redacción automatizada y control de versiones, generalmente se integran en programas CAD.

En el contexto del análisis de sistemas de fabricación, el modelado tiene un gran número de aplicaciones, algunas enumeradas a continuación junto con los tipos subyacentes de modelado que se utilizan típicamente para estas aplicaciones [10].

- *Equilibrio de la línea de montaje*: El diseño de las líneas de montaje y el proceso de equilibrarlas. El equilibrio consiste en garantizar que una línea tenga recursos suficientes (por ejemplo, trabajadores o equipos) para cumplir con la tasa de producción requerida, sin exceso de capacidad adicional.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos.

- *Planificación de la capacidad*: Modelado de elementos externos impredecibles de un entorno empresarial para garantizar que el negocio tenga la capacidad suficiente para hacer frente a las fluctuaciones. Para la fabricación, esto incluirá fluctuaciones en la oferta y la demanda, y garantizar que la empresa tenga suficiente almacenamiento, amortiguadores y capacidad de producción para hacer frente, o identificar áreas que podrían cambiarse o perfeccionarse para cumplir con la capacidad requerida.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Dinámica del sistema, Simulación Monte Carlo, Simulación Petri-net.

- *Fabricación celular*: Optimización del diseño de una configuración de fabricación celular para aumentar la capacidad de producción y mejorar la ergonomía del operador. También verificar nuevos esquemas de programación o planes de proceso para posibles problemas operativos.

Métodos de modelado: Simulación virtual

- *Gestión de transporte*. Modelización de la cadena de suministro para evaluar la efectividad del enrutamiento del vehículo, la carga de camiones, la utilización del centro de distribución y los enfoques de gestión de incidentes.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Simulación basada en agentes, Simulación Petri-Net, Otros (Simulación de tráfico, un conjunto especializado de métodos de modelado para el transporte)

- *Pronosticar*. Predecir patrones futuros y análisis de tendencias. En un contexto de fabricación, esto generalmente significará pronóstico del mercado para predecir la demanda de productos de una empresa en situaciones globales cambiantes.

Métodos de modelado: dinámica del sistema

- *Gestión de inventario*. Evaluación del costo y beneficios de mantener inventario, ya sea para ahorrar espacio o seguro contra la interrupción del suministro. También puede incluir elementos de la política de utilización de inventario (es decir, cuándo reponer existencias, qué existencias usar primero) y comprender a qué nivel de existencias debe colocarse una orden de reposición.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Simulación de Monte Carlo.

- *Justo a tiempo*. Diseño de sistemas de fabricación justo a tiempo (JIT), que son sistemas en los que la recepción de piezas de los proveedores se alinea muy estrechamente con cuando se deben usar las piezas (es decir, las piezas llegan "justo a tiempo"), lo que resulta en bajos niveles de inventario requeridos y tiempos de ciclo más rápidos. Esto requiere una línea de producción muy cuidadosamente equilibrada, ya que incluso pequeñas interrupciones en el suministro o el proceso pueden causar retrasos significativos en todo el sistema.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Simulación inteligente.

- *Ingeniería de procesos - fabricación*. Diseño de procesos de fabricación, incluyendo elementos de diseño de procesos, optimización de ramp-up y medición y optimización del rendimiento. También se puede utilizar para planificar instalaciones nuevas completas o para evaluar el impacto potencial de las adquisiciones de nuevos equipos.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Dinámica del sistema, Simulación basada en agentes, Simulación Monte Carlo, Simulación Petri-net, Simulación virtual, Simulación inteligente.

- *Ingeniería de procesos – Servicio*. Diseño de procesos de servicio como logística y distribución, manejo de residuos, retail y la industria de servicios, y servicios financieros. Los procesos de servicio comparten muchas preocupaciones similares con el proceso de fabricación, incluida la programación, la capacidad, el análisis de cuellos de botella y la medición y optimización del rendimiento.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Dinámica del sistema, Simulación distribuida.

- *Planificación de la producción y control de inventario.* Una especialización de la ingeniería de procesos: fabricación, planificación de producción y control de inventario se centra específicamente en la optimización del tamaño de lote, el análisis de cuellos de botella, la previsión y la programación.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Simulación basada en agentes, Simulación distribuida.

- *Compra.* Optimización de las estrategias de compra de piezas y suministros, incluyendo cuándo reponer existencias, y comprensión de tamaños mínimos de compra y descuentos a granel para mantener existencias suficientes con el precio mínimo y sin exceso de inventario.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos.

- *Asignación de recursos.* Asignación de equipos, trabajadores y tiempo / horas extras a tareas para mejorar los flujos de procesos y la productividad en circunstancias variables. También puede incluir la asignación de materias primas, herramientas y almacenamiento a los procesos.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Simulación basada en agentes, Simulación Monte Carlo, Simulación distribuida, Simulación inteligente.

- *Programar.* Modelado de un proceso de producción para probar posibles secuencias de trabajos para optimizar el rendimiento y garantizar que los pedidos se entreguen a tiempo. Esta es un área temática amplia, que incluye elementos de análisis de rendimiento y capacidad de producción, asignación de recursos, planificación de la fuerza de trabajo y análisis de compensación entre objetivos conflictivos, como la fiabilidad de la entrega y el costo de fabricación.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Simulación basada en agentes, Simulación Monte Carlo, Simulación Petri-net, Simulación inteligente.

- *Estrategia.* Modelado de un negocio o sistema para simular el efecto del cambio de política de alto nivel y las estrategias empresariales propuestas.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Dinámica del sistema, Simulación basada en agentes, Simulación de Monte Carlo, Simulación de juegos.

- *Gestión de la cadena de suministro.* Modelar sistemas de cadena de suministro complejos e interconectados para comprender los vínculos críticos, cómo se debe

distribuir el inventario, programar las entregas y evaluar la inestabilidad y la robustez en una red de suministro.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Dinámica del sistema, Simulación basada en agentes, Simulación Petri-net, Simulación de distribución, Simulación de juegos.

- *Planificación de la fuerza de trabajo.* Modelar el impacto de los diferentes patrones de turno y niveles de personal, el impacto de la capacitación y la capacitación cruzada (capacitar a los empleados en múltiples trabajos o procesos para que puedan ser reasignados más fácilmente) y el impacto del aumento de la mano de obra frente a la inversión en nuevos equipos.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos

- *Gestión de mantenimiento.* Modelado de esquemas y programas de mantenimiento propuestos contra las fallas previstas de los equipos, para evaluar el equilibrio entre el tiempo y el costo de la política de mantenimiento versus la probabilidad y el impacto de un fallo.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Simulación Monte Carlo, Simulación virtual.

- *Gestión del conocimiento.* Modelizar la introducción y el diseño de nuevos productos, las curvas de aprendizaje de nuevos procesos o políticas, así como comprender el impacto de la formación a nivel de organización.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Dinámica del sistema.

- *Gestión de proyectos.* Modelar escenarios potenciales en torno a la ejecución del proyecto y comprender qué enfoque de gestión de proyectos es más adecuado y comprender el impacto propagado de los retrasos o interrupciones.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Dinámica del sistema, Simulación Monte Carlo, Simulación Petri-net, Simulación inteligente.

- *Diseño organizacional.* Modelización de cambios en la estructura y el comportamiento organizativos y análisis de los efectos en los resultados empresariales.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Dinámica del sistema, Simulación basada en agentes, Simulación de juegos.

- *Formación y educación en gestión.* Modelar los resultados de la capacitación y educar a la gerencia de una organización.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Dinámica del sistema, Simulación de juegos, Simulación distribuida, Simulación virtual.

- *Gestión financiera*. Estimación de los costos, riesgos y resultados de cambios financieros o adquisiciones de capital.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Simulación de Monte Carlo.

- *Gestión de la calidad*. Un dominio de amplio alcance que modela los resultados de diferentes paradigmas de calidad en resultados mensurables en una empresa manufacturera. Los paradigmas de calidad incluyen mejora continua, seis sigma, gestión de calidad total, lean y muchos más.

Métodos de modelado: Simulación de eventos discretos, Dinámica del sistema

5.3.4 Evaluación de herramientas de modelado

Se puede ver que existe un gran número de dominios en los que el modelado y la simulación se pueden aplicar en una empresa de fabricación. Muchos paquetes de software cubrirán varios dominios en un solo paquete, o pueden estar dirigidos a un sector específico. La gama de herramientas de modelado cambia constantemente, y aunque algunos ejemplos se enumeran a continuación, es importante evaluar un paquete según sus propias necesidades y comprender qué tan bien encaja dentro de su negocio. Algunos criterios para la evaluación incluyen [8]:

- Manejo de información heterogénea relacionada con el diseño de productos, procesos y recursos, y su funcionamiento durante el proceso de fabricación. Si un modelo no puede interpretar la variedad de información que se le proporciona, el modelo no puede funcionar.
- Integración de conocimientos e información desde diferentes herramientas y técnicas trabajando a diferentes niveles de detalle. Los modelos y simulaciones funcionan a diferentes niveles de precisión y detalle de acuerdo con sus necesidades y requisitos. Es necesario combinar información de múltiples fuentes y otros modelos para sacar conclusiones significativas.
- Mantenimiento de la representación virtual del sistema de fabricación para que pueda sincronizarse constantemente con la contraparte física. Un modelo solo es útil si modela con precisión el mundo físico, por lo que es fundamental que una herramienta facilite la actualización y el cambio del modelo a medida que cambia el equivalente físico.
- Permitir a los ingenieros y técnicos del taller sacar conclusiones útiles sin la necesidad de especialistas en modelado y simulación, para garantizar que la información esté disponible para quienes la necesiten.

- Disminución de los costos de inversión y operación, ahorrando dinero a la empresa si aprovecha el modelo en lugar de adoptar un enfoque de "probar y ver" para la planificación y el diseño de procesos.

El modelado y las simulaciones son herramientas altamente efectivas para predecir el resultado de un proceso de fabricación, una línea de producción o una cadena de suministro. Sin embargo, la mayoría de las técnicas y paquetes se adaptan mejor a áreas específicas y tienen sus propias fortalezas y debilidades. Las mejores simulaciones y modelos se componen de múltiples simulaciones y modelos más pequeños que comparten información para proporcionar un nivel de predicción más preciso. Para permitir este enfoque, las plataformas eficaces apoyan la interoperabilidad entre las herramientas de fábrica digitales. Sin embargo, no todas las plataformas lo hacen, y uno debe ser cauteloso al adoptar o desarrollar una herramienta que no admita lo siguiente [8]:

- *Un modelo de datos común y estándar* para representar entidades relacionadas con sistemas de producción, recursos, procesos y productos. El uso de estándares hace que compartir datos o traducir los datos entre diferentes formatos sea considerablemente más sencillo.
- *Un almacenamiento de datos compartido* accesible por diferentes herramientas digitales de fábrica para recuperar y contribuir con datos. Los modelos de datos estándar son importantes, pero los datos deben almacenarse en un lugar que sea fácilmente accesible. El almacenamiento de datos en la nube es cada vez más común para esto, lo que permite un acceso sencillo a los datos desde cualquier lugar.
- Un *middleware* capaz de acceder a datos compartidos e interpretarlos / convertirlos correctamente de acuerdo con el modelo de datos empleado. Es menos común que los modelos de simulación se comuniquen directamente. En cambio, el software de middleware actúa como intermediario.

El software de simulación de fabricación debe encontrar un equilibrio entre tres atributos clave:

- *Eficacia*: ¿Qué tan precisos son los resultados de la simulación y qué tan bien logra el software los objetivos del usuario?
- *Eficiencia*: ¿Cuánto tiempo le toma al usuario configurar la simulación?
- *Facilidad de uso*: ¿Qué tan fácil es usar el software? ¿Tan pronunciada es la curva de aprendizaje?

Un software de simulación ideal tendrá excelentes resultados en los tres aspectos, pero en la práctica diferentes paquetes de software priorizarán diferentes atributos. Además, el software de simulación generalmente se especializa en diferentes áreas, como el equilibrio de líneas, la programación, el modelado de la cadena de suministro, el modelado de inventario y muchos más. Elegir un paquete consiste en comprender lo que está tratando de modelar y qué atributos desea priorizar. Otras

características que puede considerar al seleccionar un paquete de simulación incluyen:

- *Confianza*: ¿hay ejemplos de implementaciones exitosas de este paquete de software?
- *Costo*: ¿Qué tan caro es el paquete? ¿El soporte cuesta extra? ¿Es un costo único o una suscripción?
- *Tiempo de ejecución del modelo*: ¿Cuánto tiempo tarda el software en producir una respuesta?
- *Informes*: ¿Cómo se informan los resultados de la simulación, y es una forma que es útil para su negocio?
- *Soporte*: ¿Hay una mesa de ayuda que pueda pedir ayuda? ¿Hay capacitación disponible?

5.3.5 Ejemplo de herramientas de modelado y simulación de fabricación

La siguiente no es una lista exhaustiva de herramientas de modelado y simulación, pero sirve como un ejemplo de la gama de herramientas disponibles. La mayoría de los paquetes cubrirán varios dominios relacionados descritos en la sección 5.3.3, por lo que una sola pieza de software puede resolver múltiples desafíos en un área común. Es importante tener en cuenta que el campo cambia constantemente, y antes de dedicar tiempo y dinero a una solución, una empresa debe investigar las herramientas actualmente disponibles y evaluarlas con las preguntas y criterios descritos en la sección 5.3.4 .

- *ARENA* es un software de simulación que proporciona una forma rápida, fácil e intuitiva de construir un proceso de fabricación. Se basa en elementos y estructuras de arrastrar y soltar con visualizaciones 2D y 3D. También proporciona un panel de control para la optimización de la fabricación, identificar los cuellos de botella del proceso, mejorar la logística y evaluar los posibles cambios en el proceso.
- *AutoMod* es un simulador 3D capaz de modelar, analizar y emular grandes y complejos sistemas de fabricación, distribución y manejo de materiales proporcionando un lenguaje de simulación. Se ha empleado en gran medida en el sector de la automatización relacionado con industrias en automoción, aeropuerto, líneas postales, almacenamiento y manejo de materiales.
- *Dassault Systèmes DELMIA* es un completo paquete de software de fabricación y simulación digital, que permite a los usuarios analizar el rendimiento de la producción simulada y en vivo y documentar los resultados para la toma de decisiones. Cuenta con un entorno de fábrica digital 3D colaborativo para la simulación y análisis de flujo de procesos, precisión y rentabilidad. DELMIA ofrece un entorno de simulación de eventos discreto, flexible y basado en objetos combinado con visualización y una enorme gama de características y opciones.

- *Frepple* (Free Production Planning) es un software de planificación de la cadena de suministro de código abierto. Se centra en la planificación de la producción limitada por las capacidades de la máquina / operador, la disponibilidad de materiales y los plazos de entrega. Además, proporciona planificación de inventario y previsión de demanda.
- *Predator* ofrece soluciones de fabricación independientes o totalmente integradas para la fabricación y automatización esbelta. En la suite se incluyen una variedad de herramientas de modelado y simulación centradas principalmente en el mecanizado CNC. Predator Virtual CNC es un ejemplo de una simulación de dominio de recursos que permite la verificación y optimización del código G CNC fuera de línea antes de comenzar el proceso físico.
- *FlexSim 3D* es un software de simulación diseñado para procesos de modelado, incluyendo fabricación, embalaje, almacenamiento, manipulación de materiales, etc. Importa objetos de procesamiento relevantes producidos con diseños físicos basados en CAD. FlexSim permite a los usuarios finales probar todas las opciones para encontrar las mejores combinaciones de características operativas para optimizar el rendimiento y reducir los costos. Además, proporciona soporte a través de una animación 3D precisa e informes estadísticos para ejecutar escenarios "qué pasaría si" y tomar decisiones informadas.
- *Simio* proporciona un sistema compuesto por objetos inteligentes que representan componentes físicos como carretillas elevadoras y transportadores. Esta solución de fabricación abarca un conjunto de industrias como la fabricación discreta, automotriz, bienes empaquetados de consumo, metales y plásticos. Las áreas de aplicación son el diseño de plantas de producción de campo verde, la mejora de procesos utilizando Six Sigma y Lean Manufacturing, la planificación de la producción y la programación.
- *Tecnomatix* es el conjunto de tecnologías de simulación de fabricación de Siemens. Está estrechamente relacionado con sus productos de automatización, lo que permite que los resultados de las simulaciones se apliquen directamente a (por ejemplo) controladores PLC, un proceso llamado "puesta en marcha virtual".
- *Lanner Witness* es un paquete de simulación de procesos que utiliza el modelado de eventos discretos y continuos, lo que lo hace aplicable a una amplia gama de tareas de modelado. También cuenta con una extensa biblioteca de modelos 2D y 3D de recursos de fabricación, lo que permite tanto la simulación como la visualización de las líneas de fabricación propuestas.

5.4 Conclusión

Las herramientas de modelado son extremadamente valiosas en el ámbito de la fabricación. Los sistemas de fabricación son extremadamente complejos y valiosos, por lo que comprender cómo funcionan, cuáles serán los efectos de los cambios

propuestos y mitigar el riesgo y la incertidumbre son actividades valiosas a término. El uso de estas herramientas permite realizar cálculos y simulaciones más complejos que realizar el análisis a mano con fórmulas matemáticas.

Sin embargo, un sistema de fabricación es una cosa dinámica, evolutiva y cambiante, y cualquier modelo de un sistema debe ser preciso para dar resultados útiles. Incluso con las herramientas de modelado, la creación de un modelo útil preciso requiere mucho tiempo y es compleja, y existe el riesgo de que el modelo final ya no refleje con precisión el sistema de fabricación. También está la cuestión de obtener los datos necesarios para que el modelo sea preciso en primer lugar.

Un *Digital Twin* es un modelo en vivo y actualizado automáticamente de un sistema de fabricación que puede realizar simulaciones. En lugar de ser creado sin conexión por un trabajador, está vinculado directamente al gemelo físico y utiliza datos en vivo recopilados del sistema del mundo real para mantener el modelo preciso y actualizado. Crear un gemelo digital es más complicado que un modelo fuera de línea, pero el costo de mantenerlo actualizado se reduce significativamente. El siguiente capítulo discutirá los gemelos digitales y cómo se pueden implementar.

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

5.5 Referencias

- [1] S. Santoso, E. J. Powers and W. M. Grady, "Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 3, pp. 1250-1257, 1997.
- [2] M. K. Jeong, J. C. Lu, X. Huo, B. Vidakovic and D. Chen, "Wavelet-based data reduction techniques for process fault detection.," *Technometrics*, vol. 48, no. 1, pp. 26-40, 2006.
- [3] G. Press, "Cleaning Big Data: Most Time-Consuming, Least Enjoyable Data Science Task, Survey Says," *Forbes*, 23 March 2016. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2016/03/23/data-preparation-most-time-consuming-least-enjoyable-data-science-task-survey-says/>.

- [4] NIST/SEMATECH, "Engineering Statistics Handbook," 30 October 2013. [Online]. Available: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. [Accessed 21 11 2020].
- [5] L. Monostori, J. Váncza and S. R. Kumara, "Agent-based systems for manufacturing," *CIRP annals*, vol. 55, no. 2, pp. 697-720, 2006.
- [6] P. Vrba and V. Marcík, "Simulation in agent-based control systems: MAST case study.," *IFAC Proceedings*, vol. 38, no. 1, pp. 145-152, 2005.
- [7] A. Oyarbide, T. S. Baines, J. M. Kay and J. Ladbroke, "Manufacturing systems modelling using system dynamics: forming a dedicated modelling tool.," *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 71-87, 2003.
- [8] T. Tolio, M. Sacco, W. Terkaj and M. Urgo, "Virtual factory: An integrated framework for manufacturing systems design and analysis.," *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 25-30, 2013.
- [9] Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association (IEEE SA), *IEEE 1278.1-2012 - IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation--Application Protocols*, 2012.
- [10] M. Jahangirian, T. Eldabi, A. Naseer, L. K. Stergioulas and T. Young, "Simulation in manufacturing and business: A review," *European Journal of Operational Research*, vol. 203, no. 1, pp. 1-13, 2010.



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