

Capítulo 4

Análisis de sistemas de fabricación

Jack C Chaplin y Giovanna Martinez-Arellano

4.1 Implantación

Análisis (sustantivo): examen detallado de los elementos o la estructura de algo.

- Oxford University Press

La toma de decisiones efectiva es crítica en las empresas manufactureras, y seleccionar el curso de acción correcto puede ser la diferencia entre una empresa exitosa y competitiva, y quedarse atrás de la competencia. La toma de decisiones es el proceso de selección de un curso de acción para lograr mejor sus objetivos, dadas las opciones y la información disponible. Las decisiones rara vez son simples, y la persona que toma las decisiones debe seleccionar la mejor opción para maximizar uno o más criterios, y a menudo debe hacerlo con información incompleta.

Dentro del ámbito de la fabricación, la toma de decisiones efectiva es crucial para seguir siendo competitiva. Por ejemplo, tomar grandes decisiones de inversión conlleva un riesgo significativo y una recompensa también significativa, y esto es especialmente cierto para las empresas más pequeñas. La toma de decisiones eficaz se logra mejor con acceso a datos precisos y de alta calidad que luego se convierten y se presentan en formas más utilizables. Los datos se pueden convertir en formas más utilizables para lograr el máximo valor e informar a la empresa de fabricación. Esto a menudo se describe como la diferencia entre los datos y la información, siendo el primero los números brutos o las mediciones, y el segundo siendo una visión procesable del proceso de fabricación.

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*

Una representación común de esto es la pirámide de datos, información, conocimiento, sabiduría (DIKW), que se muestra en la Figura 4.1-1. Cada paso de la pirámide se puede analizar y comprimir a la siguiente etapa, reduciendo lentamente el volumen bruto de información y aumentando la visión y el valor. Dentro de este marco, los pasos se definen como:

- *Datos*: Señales o números que representan fenómenos físicos de sensores, pero sin contexto ni metadatos.
- *Información*: Contextualizada e inferida de los datos, la información tiene significado y contexto, y puede ser utilizada para responder preguntas.
- *Conocimiento*: información procesada que se ha comparado con experiencias anteriores para permitir al usuario determinar por qué ocurrieron cosas.
- *Sabiduría*: A veces se omite de este modelo o se combina con el conocimiento, la sabiduría es usar el conocimiento para comprender intuitivamente un proceso y determinar las mejores acciones futuras.

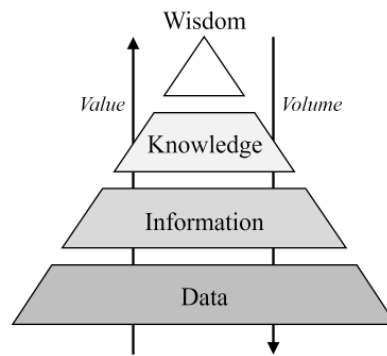


Figura 4.1-1 La pirámide DIKW muestra cómo los datos, la información, el conocimiento y la sabiduría están interrelacionados y cómo se comparan en términos de volumen de almacenamiento requerido y valor inherente.

Hay muchas fuentes de datos en las empresas manufactureras, pero una de las más importantes son los datos generados por las líneas y sistemas de fabricación. El análisis, la modelización y la simulación de sistemas de fabricación se ocupan de métodos para comprender mejor los procesos de fabricación y las líneas de fabricación. Al comprender la situación actual y probar los posibles cambios, es posible garantizar que las posibilidades de éxito se maximicen antes de realizar cambios potencialmente costosos (en términos de tiempo de inactividad del equipo o de la línea) a la empresa de fabricación. Además, estos métodos permitirán rastrear el rendimiento de los sistemas de producción a lo largo del tiempo, permitiendo el seguimiento de las mejoras a medida que se implementan o detectar problemas antes de que se vuelvan críticos. Las técnicas aquí se pueden aplicar desde las líneas de fabricación más pequeñas (que podrían ser solo un centro de mecanizado con un

trabajador de carga y descarga de piezas) hasta líneas de fabricación más grandes y complejas.

Sin embargo, la simulación y el modelado a menudo pueden ser excesivos para muchos sistemas de fabricación. La evaluación matemática estándar puede revelar información sobre los sistemas de fabricación que no son inmediatamente obvias. Comprender la utilización, la fiabilidad, los rendimientos y las capacidades es un primer paso esencial para maximizar la productividad mediante la identificación de áreas para mejorar. Estas áreas permitirán dirigir las intervenciones a las áreas que darán el mayor rendimiento.

Este capítulo del libro discute los requisitos previos para el análisis de fabricación; comprender el tipo de sistema a evaluar y comprender la pregunta que debe responderse. Luego pasa a discutir dos métodos clave de análisis de fabricación matemática fuera de línea: análisis de producción convencional y teoría de colas.

4.1.1 Morfologías de sistemas de fabricación

Morfología (sustantivo): El estudio de las formas de las cosas.

- Oxford University Press

Para entender cómo analizar un sistema de fabricación, primero es importante comprender la forma y el método de funcionamiento del sistema, ya que esto influirá en los métodos y fórmulas utilizados. Conocer la terminología de su sistema de fabricación también simplifica la búsqueda de recursos y asesoramiento aplicables. Un resumen diagramático de estos sistemas de fabricación de morfologías se puede encontrar en las figuras 4.1-2 a 4.1-5 .

Los sistemas de fabricación dedicados (DMS) utilizan automatización fija para producir productos básicos a gran volumen con la máxima rentabilidad. Cuando es probable que un solo producto se fabrique en grandes cantidades sin alteraciones importantes en el futuro previsible, un DMS es casi siempre la mejor opción, mientras que al mismo tiempo a menudo es más fácil de implementar. El equipo suele estar dispuesto de manera lineal, la *línea de producción* estereotipada, y está vinculado con un sistema de manipulación de materiales para mover las piezas a lo largo.

Donde los volúmenes son más bajos y se van a fabricar varias piezas, la *fabricación por lotes* es una de las estrategias de fabricación más comunes, lo que permite la fabricación de volúmenes medios mediante la producción por lotes. El tiempo necesario para cambiar una línea de producción entre tipos de producto es significativo, por lo que el procesamiento por lotes garantiza que este tiempo de cambio ocurra con la menor frecuencia posible.

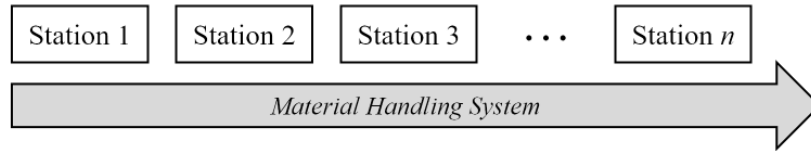


Figura 4.1-2 Un ejemplo de sistema de fabricación dedicado, que muestra la morfología típica de la línea de producción. Un único sistema lineal de manipulación de materiales transfiere piezas o productos entre procesos en secuencia. Los procesos podrían ser piezas individuales de equipo, estaciones de proceso manuales o múltiples piezas similares de equipo para formar una estación de procesamiento con capacidad de procesamiento paralelo.

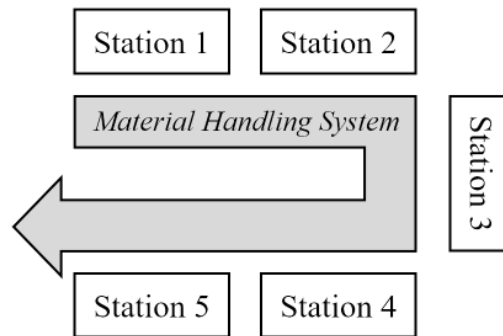


Figura 4.1-3 Un diseño de celda de fabricación de ejemplo. La flecha representa el flujo más común de piezas a través de la célula, pero la fabricación celular puede alterar el camino para hacer una variedad más amplia de productos sin interrupción significativa.

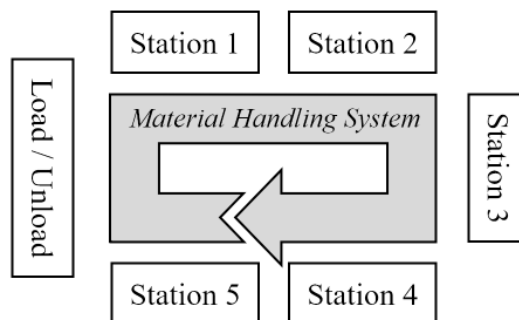


Figura 4.1-4 Ejemplo de diseño de un sistema de fabricación flexible. Las piezas se pueden enrutar entre cualquier estación en cualquier orden usando el sistema de manipulación de materiales.

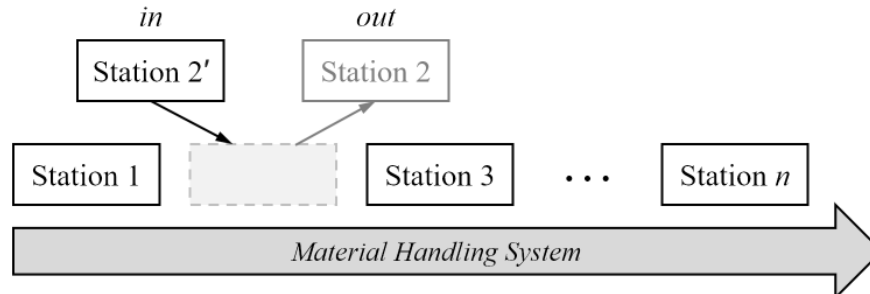


Figura 4.1-5 Los sistemas de fabricación reconfigurables permiten cambios estructurales rápidos en la célula para cambiar su funcionalidad.

La *tecnología de grupo* es la estrategia de ganar eficiencia cuando se van a fabricar muchos productos similares agrupando productos en familias de piezas con características y procesos de fabricación similares. Por ejemplo, una empresa que fabrica rodamientos puede fabricar el mismo rodamiento en múltiples tamaños diferentes, con múltiples acabados y múltiples métodos de lubricación diferentes. Aunque esto constituiría un gran número de variantes de piezas potenciales, la comunidad entre ellas permite que se produzcan con la misma maquinaria (aunque con diferentes configuraciones y herramientas) y, por lo tanto, comprendan una familia de piezas. En comparación, aunque una función similar, un rodamiento de bolas y un rodamiento de rodillos cilíndricos requieren procesos suficientemente diferentes para que no constituyan una sola familia de piezas.

La utilización de la tecnología de grupo permite configurar y configurar una línea de producción para producir rápidamente cualquier miembro de la familia de piezas. Esto hace que el cambio entre productos de la misma familia sea mucho más rápido y sencillo, lo que reduce el cambio de lotes a lo largo de los tiempos y hace que los tamaños de lotes más pequeños sean más rentables.

La *fabricación celular* agrupa las máquinas en celdas, donde cada celda está especializada en completar un paso o grupo de pasos estrechamente relacionados necesarios para fabricar un producto o una familia de productos. El tiempo de fabricación se reduce al acercar las máquinas; la forma de U característica como se muestra en la Figura 4.1-3 es un diseño de celda común y permite a un único operador que se especializa en la tarea de la celda supervisar todas las máquinas, y el orden en que se utilizan las máquinas en la celda se puede cambiar sin interrupciones significativas. La fabricación celular es una gran opción para volúmenes más bajos de productos altamente variables. Los múltiplos de la misma máquina en una celda pueden agruparse en estaciones ubicadas conjuntamente para aprovechar el paralelismo, y las máquinas que casi siempre se usan juntas también pueden agruparse en estaciones.

Los *sistemas de fabricación flexibles* (FMS) son celdas de fabricación altamente automatizadas, capaces de enrutar automáticamente las piezas entre las máquinas

constituyentes, lo que permite flexibilidad en términos de piezas y familias de piezas producidas. Se muestra en la Figura 4.1-4, una de las diferencias que definen de un sistema celular es el uso de un sistema automatizado de manipulación de materiales para enrutar productos alrededor del sistema. Las estaciones en un FMS son en sí mismas generales y flexibles, predominantemente máquinas de control numérico por ordenador (CNC), a menudo con cambiadores automáticos de herramientas. Esto permite que las estaciones se utilicen para una gama más amplia de tareas. Los FMS son ideales para volúmenes más bajos de productos altamente variables similares a la fabricación celular, pero los altos niveles de automatización aumentan la productividad laboral y permiten una producción desatendida.

Los *sistemas de fabricación reconfigurables (RMS)* utilizan tanto un diseño estructural como un sistema de control digital que permite cambiar fácilmente las estaciones constituyentes, por lo que la función y la capacidad del sistema pueden alterarse rápidamente. Las estaciones se pueden enchufar dentro y fuera del sistema para cambiar la función de la célula. También se pueden agregar o quitar módulos funcionales adicionales de la máquina y / o estaciones para cambiar su funcionalidad o aumentar la capacidad. El sistema puede escalar hacia arriba o hacia abajo la capacidad añadiendo o quitando los módulos, las máquinas, o las estaciones. Las estaciones individuales a menudo son menos flexibles de lo que se usaría en un FMS: la flexibilidad del sistema se da a través de la estructura del sistema, no de la flexibilidad individual.

Las técnicas de análisis matemático tradicionales generalmente se centran en líneas de fabricación dedicadas y morfologías de fabricación celular, con variantes para cuando se implementa la fabricación por lotes en cualquiera de los dos. FMS y RMS son desarrollos comparativamente recientes, y su naturaleza evolutiva y cambiante los hace menos adecuados para estos estilos de análisis. El uso de herramientas digitales y, en particular, la actualización automática de gemelos digitales puede ser más apropiado aquí para ayudar a gestionar los cambios, y los gemelos digitales se discutirán en el Capítulo 6.

4.1.2 Toma de decisiones

Antes de comenzar el análisis de un sistema de fabricación, es importante entender qué pregunta realmente está tratando de responder. El análisis generalmente sirve para informar la toma de decisiones midiendo los indicadores clave de rendimiento (KPI). Al descubrir valores para los KPI, puede comprender mejor las fortalezas y debilidades del sistema actual y tomar decisiones sobre cómo mejorarlo.

Las decisiones en la fabricación pueden significar una amplia variedad de opciones diferentes, pero Hayes y Wheelwright [1] separan esto en diez categorías posibles de decisiones. Estos se detallan a continuación junto con listas no exhaustivas de qué tipo de opciones incluyen estas categorías:

- *Capacidad*: cuánta flexibilidad de capacidad debe estar disponible, qué patrones de cambio deberían utilizarse y qué estrategias están disponibles para la subcontratación en situaciones temporales de sobre o baja capacidad.
- *Instalaciones*: El tamaño, la capacidad máxima, la ubicación física y la asignación de tareas primarias de las instalaciones de fabricación física.
- *Recursos Humanos*: Las políticas en torno al reclutamiento de nuevos empleados, la capacitación y el desarrollo de los empleados existentes, y la cultura y el estilo de gestión que adopta el negocio.
- *Introducción de nuevos productos*: Cómo se seleccionan y desarrollan los nuevos productos, así como los procedimientos para el diseño (incluido el diseño para la fabricación), y cómo se introducen y aumentan los productos en el taller.
- *Organización*: La estructura de la empresa manufacturera, así como las responsabilidades, funciones y responsabilidades.
- *Medición del desempeño*: Cómo se evalúan y supervisan los procesos y las personas en una empresa manufacturera para determinar la productividad y otras medidas de desempeño, así como cualquier esquema de reconocimiento y recompensa para los empleados.
- *Equipo de producción*: El equipo y las tecnologías elegidas para la fabricación de productos, el diseño físico de este equipo en celdas o líneas, y el nivel de automatización dentro de estas líneas. Esto también abarca enfoques y políticas de mantenimiento, y cuánto desarrollo interno de procesos nuevos o actualizados es posible.
- *Planificación y control de la producción*: Cómo se controla la producción (ya sea a través de sistemas automatizados o mediante procesos manuales), cómo se deben asignar y programar los pedidos, y cómo se almacenan y mueven los materiales alrededor de la operación de fabricación.
- *Calidad*: Los objetivos de calidad adoptados por el negocio, así como los métodos y políticas de garantía y control de calidad utilizados para alcanzar estos objetivos.
- *Integración vertical*: decisiones estratégicas de alto nivel como make versus buy, políticas sobre selección de proveedores y relaciones continuas, dependencia de proveedores únicos o múltiples para difundir el riesgo.

Para tomar decisiones efectivas, es importante entender exactamente cuál es el proceso de toma de decisiones. El proceso de toma de decisiones [2] es una serie de fases, y sigue el flujo que se muestra en la Figura 4.1-6:

1. *Inteligencia - Descubrimiento de problemas*: Primero, es necesario identificar un problema y determinar quiénes son los responsables de la toma de decisiones y las partes interesadas en el proceso de decisión. Una vez que el problema ha sido reconocido, el problema debe definirse más formalmente, determinando los requisitos de las partes interesadas para obtener una lista de consideraciones y objetivos. Es importante dedicar tiempo a esta fase, ya que el grupo de partes interesadas puede pensar que comparten una visión común del problema, pero a

menudo hay detalles que se suponen y pueden no ser compartidos entre todas las partes.

2. *Diseño – Descubrimiento de soluciones*: Encontrar posibles alternativas que podrían implementarse y evaluar sus posibles contribuciones al problema. Esto podría ser tan simple como una discusión entre las partes interesadas para intercambiar ideas, pero para la toma de decisiones críticas se recomienda seguir un proceso más riguroso. Aunque comúnmente se pasa por alto, se recomienda que "no hacer nada" es siempre una de las opciones posibles. Una recomendación común es que se modelice el problema, ya que esto permitirá probar posibles soluciones para permitir el proceso de selección en la siguiente fase. Esta es la fase en la que se crea el modelo. Los modelos podrían ser modelos numéricos desarrollados en una hoja de cálculo, simulaciones completas de líneas de producción o cualquier otra cosa. Los posibles enfoques para la modelización aquí dependen de la naturaleza de la decisión que se tome.
3. *Elección - Selección de soluciones*: Las posibles opciones desarrolladas se evalúan por su contribución al problema. Dependiendo del enfoque adoptado en la fase de diseño, esto podría ser una continuación de la discusión, recopilar datos para informar la decisión o ejecutar las posibilidades en el modelo para ver qué impacto tienen en los objetivos definidos. Incluso con un modelo completamente desarrollado, la elección de la solución rara vez es simple. Se deben evaluar muchos criterios diferentes, incluido el tiempo y el costo requeridos para implementar la solución, y el riesgo y la recompensa de hacerlo, la posible interrupción mientras se implementa la solución y la disponibilidad de habilidades para promulgarla. Recuerde evaluar no hacer nada, ya que la interrupción y el costo de implementar una solución pueden ser demasiado altos.
4. *Implementación: implementación y prueba de soluciones*: Por último, la solución debe implementarse y probarse. La solución debe cumplir con los objetivos definidos en la primera fase de este proceso, y como muchas opciones no se implementan instantáneamente o sus efectos se sienten instantáneamente, es importante seguir monitoreando y probando. Si la solución no cumple con las expectativas u objetivos, todo el proceso de toma de decisiones es iterativo. Siempre es posible regresar, repensar y volver a planificar. Es muy común que las empresas caigan en la trampa de continuar con una mala decisión cuando toda evidencia sugiere que las cosas no mejorarán (la falacia del "costo hundido"). Sin embargo, un proceso de toma de decisiones correctamente ejecutado reducirá las posibilidades de que esto ocurra.

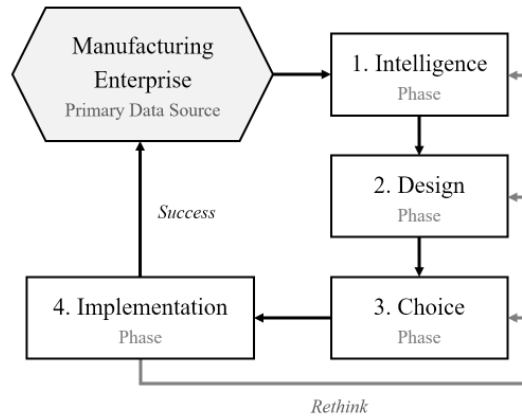


Figura 4.1-6 Fases del proceso de toma de decisiones. Nunca es demasiado tarde para volver atrás y repensar una decisión, especialmente cuando se dispone de nueva información.

Un aspecto clave de este proceso es la capacidad de monitorear y verificar el éxito de una decisión y si los cambios en los procesos de fabricación o negocio están produciendo los resultados esperados y previstos. Los indicadores clave de rendimiento (KPI) son la herramienta con la que se puede medir el éxito de una decisión.

4.1.3 Indicadores clave de rendimiento (KPI)

Para lograr un proceso de fabricación óptimo, primero debe definir qué es lo óptimo. Ningún proceso de fabricación puede maximizar simultáneamente el rendimiento, la productividad, el tiempo de actividad, etc. mientras que también minimiza el desperdicio material, el uso de la energía, y el tiempo muerto. Se requiere una selección cuidadosa de los KPI para comprender lo que es importante y lo que está tratando de lograr. Los indicadores a través de los cuales se caracteriza el rendimiento de un proceso de fabricación han evolucionado y diversificado. Los KPI tradicionales incluyen:

- *Productividad*: La eficiencia de la producción, o la relación de salida a entrada. La productividad es un KPI que desea maximizar, y hay muchas maneras de calcularlo, aunque la eficacia general del equipo (OEE) es una herramienta común y útil para la fabricación de equipos.

$$OEE = AU Y r_{os} \quad (4.1.1)$$

Donde:

- *A: disponibilidad*. El tiempo de actividad del equipo, que se reduce por mantenimiento, averías, etc.
- *U: Utilización*. ¿Qué porcentaje de tiempo utilizable posible se está utilizando realmente? La mala programación o la falta de piezas disponibles aguas arriba (también llamada inanición) reducirá esto.
- *Y: Rendimiento*. El porcentaje de rendimiento de primer paso del proceso, en referencia a la calidad de los componentes producidos.
- *r_{os}*: Capacidad de funcionamiento. El porcentaje del rendimiento máximo en el que trabaja el equipo.

Un proceso óptimo nunca se descompondrá ni requerirá mantenimiento, estará activo el 100% del tiempo, producirá piezas consistentemente de alta calidad y operará a su velocidad de procesamiento máxima, dando un OEE del 100%. Aunque un OEE del 100% no es realista, sigue siendo una herramienta útil para identificar áreas de preocupación. El porcentaje de rendimiento de primer paso de un proceso a menudo se pasa por alto, y es una parte importante de la producción magra.

- *Coste*: La reducción de los costos de procesamiento es otro objetivo común y puede ser un KPI efectivo. El costo de un proceso generalmente se obtiene combinando tasas de gastos generales y mano de obra con costos de materiales, costos de procesamiento, costos de energía y el costo de los residuos.
- *Calidad*: Maximizar la calidad y el rendimiento de los procesos es otro objetivo muy común. La forma en que se mida esto dependerá del proceso y la aplicación, pero la mejora de la calidad reduce la necesidad de volver a trabajar o devoluciones de los clientes.

Sin embargo, estos están lejos de ser los únicos KPI disponibles para las empresas manufactureras. Como parte de la encuesta de métricas más reciente realizada por la Manufacturing Enterprise Solutions Association (MESA), se identificaron 28 métricas de fabricación como las más utilizadas por fabricantes discretos, de procesos e híbridos / por lotes [3]. Estos se organizan en categorías en función del aspecto del negocio que representan y sirven como punto de partida para crear KPI para representarlos.

La eficacia general del equipo puede ser una métrica común para la *productividad*, pero está lejos de ser la única. La productividad y la eficiencia son clave para la rentabilidad y la capacidad de competencia de una empresa, por lo que los objetivos de productividad son extremadamente comunes. Algunos KPI incluyen:

- *Rendimiento*: Cuánto producto se produce en una máquina, línea, unidad o planta durante un período determinado. Las fórmulas y métodos para calcular esto se discuten en la sección 4.2 Conventional Manufacturing Systems Analysis .

- *Utilización de la capacidad*: ¿Cuánto de la capacidad de producción total de fabricación se está utilizando realmente durante un período determinado? De nuevo, véase la sección 4.2 Conventional Manufacturing Systems Analysis .
- *Eficacia general del equipo*: Se muestra en la ecuación (4.1.1), este es un medido común de la eficacia general de un equipo basado en la disponibilidad, el rendimiento y la calidad.
- *Logro de producción*: Porcentaje de tiempo que se alcanza un nivel objetivo de producción, lo que permite a una empresa cumplir con el cronograma acordado con sus clientes.

Mejorar la *calidad de los productos* es otro objetivo común para las empresas, con una calidad mejorada que resulta en menos desperdicio y retrabajo, y una mejor satisfacción del cliente. La calidad, y mejorarla, es un gran tema por derecho propio, pero algunos KPI comunes son:

- *Rendimiento*: Porcentaje de productos correctamente fabricados sin necesidad de reparación o chatarra.
- *Rechazos/devoluciones del cliente*: ¿Cuántas veces el cliente rechaza un producto? Las políticas correctas de garantía de calidad deberían reducir esta cifra.
- *Calidad del proveedor entrante*: Porcentaje de materiales de buena calidad procedentes de los proveedores no es tan incontrolable como usted podría creer. Trabajar estrechamente con los proveedores puede mejorar la calidad del suministro, pero es posible que también tenga que considerar proveedores alternativos.

Mejorar la *experiencia del cliente y la capacidad de respuesta* es un objetivo común para las empresas, pero medirlo puede ser una tarea difícil. Tres KPI comunes para esto son:

- *Entrega a tiempo para comprometerse*: Porcentaje de tiempo que un producto completado se entrega al cliente en el calendario acordado.
- *Porcentaje de pedido perfecto*: el porcentaje de veces que los clientes han recibido un pedido correcto completo a tiempo.
- *Plazo de ejecución de fabricación*: El tiempo que tarda en fabricar un producto, desde el momento en que se acepta el pedido hasta el producto terminado que se envía.
- *Tiempo para realizar cambios*: El tiempo que se tarda en cambiar una línea de producción de producir un producto a uno diferente, para satisfacer las demandas de los clientes en un mercado cambiante.

El cumplimiento normativo se ajusta a las políticas, leyes y estándares relevantes en áreas como la salud y la seguridad, la protección del medio ambiente y la seguridad de los datos. Esta es un área claramente importante con el incumplimiento

que conduce a multas y sanciones, combinado con los riesgos de los que las regulaciones están diseñadas para protegerlo. Algunos KPI en esta área incluyen:

- *Incidentes de salud y seguridad notificables*: Medida del número de incidentes de salud y seguridad notificados durante un período de tiempo, incluyendo lesiones y casi accidentes que requieren medidas para evitar que vuelvan a suceder.
- *Incidentes ambientales notificables*: Número de incidentes notificados durante un período de tiempo, incluidos derrames químicos, problemas de desechos, contaminantes del aire, etc.
- *Número de eventos de incumplimiento*: Número de veces que la planta estuvo operando en condiciones de incumplimiento durante un período de tiempo.

La *rentabilidad* y la reducción de costos son un amplio conjunto de KPI que pueden incluir aspectos más allá del proceso de fabricación y en el negocio en general. Los KPI enumerados aquí son generalmente los KPI que se ocupan de los procesos de fabricación en lugar de la empresa en su conjunto:

- *Coste total de fabricación por unidad*: Normalmente representado excluyendo materiales, esto cuánto cuesta el proceso de producción solo para fabricar un solo producto.
- *Costos de fabricación como porcentaje de los ingresos*: En relación con el KPI anterior, ¿cuál es la relación entre los costos de fabricación y los ingresos totales de la empresa?
- *Ingresos generados por empleado*: Por lo general, una comparación entre múltiples sitios de fabricación, ¿cuál es el ingreso dividido por el número de empleados?
- *Margen medio de contribución unitaria*: Beneficio obtenido por producto manufacturado.
- *Rendimiento de los activos*: Beneficio obtenido dividido por el valor de los activos y el equipo de capital desplegado necesario para generar ese beneficio.
- *Costo de energía por unidad*: Costos de energía incurridos por unidad o volumen producido.
- *Tiempo de ciclo de efectivo a efectivo*: Tiempo transcurrido entre la compra de un producto por un cliente y el cobro de pagos de la venta del producto.
- *EBITDA*: Ganancias antes de intereses, impuestos, depreciación y amortización – una métrica común para la rentabilidad de un negocio.
- *Beneficio operativo neto*: Una de las medidas más puras de rentabilidad, ¿cuál es la rentabilidad de la empresa?

Otros KPI que vale la pena considerar que no encajan en categorías más amplias incluyen:

- *Inventario de trabajo en curso (WIP)*: medición del uso eficiente de los materiales de inventario. WIP representa un valor no alcanzado, y a menudo es un riesgo para la empresa si no se puede convertir rápidamente en productos.
- *Mantenimiento planificado vs. mantenimiento de emergencia*: relación entre la frecuencia con la que se produce el mantenimiento programado y la necesidad de mantenimiento disruptivo y no planificado.
- *Tiempo de inactividad vs tiempo de operación*: disponibilidad de activos y fiabilidad.
- *Tasa de introducción de nuevos productos*: la rapidez con que se pueden introducir nuevos productos en el mercado, incluido el diseño del producto, la planificación del proceso, la rampa y la fabricación.
- *Tiempo de ciclo de pedido de cambio de ingeniería*: qué tan rápido se pueden procesar e implementar las modificaciones a los productos y planes de proceso existentes.

En su núcleo, los KPI son un concepto relativamente simple: son los objetivos medibles por los cuales un proceso de producción o cambios en ese proceso pueden ser monitoreados y evaluados. Sin embargo, hay algunas consideraciones a tener en cuenta al implementar los KPI para maximizar su utilidad.

4.1.4 Implementación de indicadores clave de rendimiento

Medir, analizar y mejorar eficazmente los KPI no es tan simple como puede parecer. Si bien ciertas métricas funcionan bien para procesos específicos, a menudo es el caso de que existen múltiples combinaciones de indicadores métricos necesarios para garantizar que se está cumpliendo un objetivo comercial más amplio. La implementación de los KPI sigue un patrón cíclico con cinco etapas:

1. *Definición*: La primera fase del ciclo de vida es la definición de los KPI que se utilizarán. Aunque hay miles de KPI ya definidos y utilizados por los fabricantes, es posible que a veces sea necesario redefinir los KPI como un KPI más enfocado o agregado según los objetivos comerciales exactos.
2. *Recolección*: La segunda fase del ciclo de vida del KPI consiste en reunir a los KPI candidatos para su consideración. De particular importancia es excluir cualquier KPI obviamente irrelevantes, ya que es común terminar con demasiados.
3. *Composición del conjunto*: El tercer paso del ciclo de vida de KPI es elegir de la colección de KPI el conjunto específico a implementar. ISO 22400-1:2014 Parte 1 [4] puede ayudar con este proceso, pero el enfoque principal es garantizar que los KPI elegidos forman un conjunto integral de medición de los objetivos del negocio sin ser demasiado onerosos para implementar y monitorear.

4. *Implementación*: En esta fase, las partes interesadas definen el proceso de evaluación, examinando periódicamente los valores y tendencias de KPI y describiendo planes de acción para mejorar el control de procesos a partir de los valores de KPI.
5. *Evaluación*: Las partes interesadas evalúan la relevancia de los KPI, es decir, qué tan bien se alinean con los objetivos de rendimiento actuales del proceso y qué tan bien se implementaron. Si es necesario, la implementación se puede ajustar para mejorar el proceso.

El proceso es un ciclo. Los KPI deben ser reevaluados periódicamente para asegurarse de que siguen cumpliendo con las necesidades y requisitos de la empresa. A medida que se elige cada KPI, se deben recopilar los datos para medir el KPI, y para ello los datos deben ser visibles y transparentes.

La visibilidad y la transparencia son requisitos previos clave para la optimización de los procesos de fabricación. Cuanta más información disponible sobre un proceso de producción, mejor rendimiento se puede medir a través de KPI y se pueden tomar mejores decisiones sobre cómo reaccionar ante eventos y problemas.

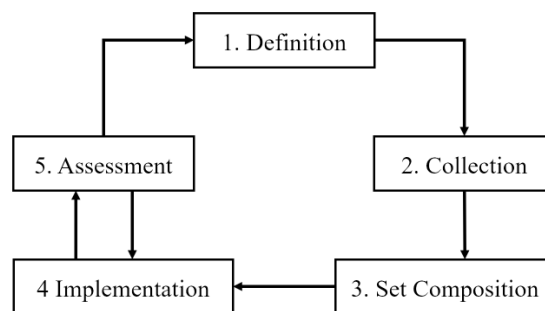


Figura 4.1-7 Ciclo de Vida del KPI.

- *Datos visibles*: Datos a los que es fácil acceder con procesos bien definidos para hacerlo.
- *Datos transparentes*: Datos que son fáciles de entender y tomar decisiones basadas en ellos.

A pesar de la importancia de la visibilidad y la transparencia de los procesos, en muchas empresas todavía faltan esquemas de informes en tiempo real con KPI estandarizados. Incluso cuando se implementa la recolección de KPI, estos a menudo requieren un proceso de entrada manual a través de formularios en papel. Los datos reportados a menudo se basan en cantidades, por ejemplo, unidades producidas por turno, en lugar de métricas más perspicaces. A menudo faltan datos importantes para la optimización del proceso, como los tiempos de configuración, los tiempos de cambio, los tiempos de procesamiento o los tiempos de inactividad,

por lo que no se pueden informar. Aquí es donde las tecnologías modernas como los sensores inteligentes y la Internet de las cosas pueden ser beneficiosas y se discutirán más en el Capítulo 6.

4.2 Análisis de sistemas de fabricación convencional

Las técnicas de fabricación digitales están cambiando la implementación de los sistemas de fabricación y su análisis, y la simulación y el modelado ahora son prácticas comunes en una amplia gama de sectores y tamaños de empresa. Un área clave en la que estas técnicas pueden mejorar el rendimiento de un sistema es a través del análisis del sistema y la identificación de áreas para mejorar. Sin embargo, los métodos utilizados para analizar sistemas con herramientas digitales se basan en un marco sólido de análisis de sistemas de producción más convencionales, y comprenderlos ayudará a comprender dónde y por qué deben utilizarse técnicas más complejas.

4.2.1 Análisis de producción

Productividad (sustantivo): La efectividad del esfuerzo productivo, especialmente en la industria, medida en términos de la tasa de producción por unidad de entrada.

- Oxford University Press

De todos los KPI a monitorear, la productividad de un sistema de fabricación es uno de los más comúnmente deseados, pero también uno de los más comúnmente mal entendidos debido a su naturaleza a menudo abstracta. Todos queremos mejorar la productividad, pero ¿qué significa eso realmente?

La productividad es la relación de salida a entrada de un proceso. Más formalmente:

$$Productividad = \frac{Unidades\ de\ salida}{Unidades\ de\ entrada} \quad (4.2.1)$$

Las unidades de salida son los productos que el proceso de fabricación está creando, pero las unidades de entrada pueden ser de varios tipos, incluyendo:

- *Capital*: La producción producida por unidad de capital, es decir, productos fabricados por euro/libra/dólar gastado. Esto puede incluir el valor no recurrente de activos como herramientas, plantas y equipos, así como costos recurrentes como costos de mantenimiento o servicios públicos.

- *Trabajo*: La producción por persona, o más específicamente por persona-hora. Cuando los procesos manuales son clave, la mejora de la productividad laboral puede tener efectos significativos. Esto podría implicar la mejora de la ergonomía de la estación de procesamiento, la aplicación de tecnologías de asistencia, o la moral simple y la motivación.
- *Material*: La producción por unidad de material, como materias primas o piezas utilizadas en el proceso de fabricación. Mejorar la calidad y reducir los residuos mejorará la productividad de los materiales.

La productividad es un objetivo de alto nivel, e identificar cómo aumentarla requiere identificar áreas para mejorar en un sistema de fabricación. La productividad es un indicador clave de rendimiento: una medición del rendimiento del proceso de fabricación, un resultado deseable. Sin embargo, un concepto de nivel inferior es el de una *métrica*. Una métrica es un valor medido que no es necesariamente deseable de forma aislada, pero contribuye a un KPI. El análisis de fabricación tradicional normalmente mide métricas, que a su vez identifican áreas de atención que, de mejorarse, podrían afectar el KPI, que es el objetivo real del proceso de mejora.

Las métricas de medición permitirán realizar un seguimiento del rendimiento de los sistemas de producción a lo largo del tiempo, permitiendo el seguimiento de las mejoras a medida que se implementan o detectar problemas antes de que se vuelvan críticos. Las técnicas aquí se pueden aplicar desde las líneas de fabricación más pequeñas (que podrían ser solo un centro de mecanizado con un trabajador de carga y descarga de piezas) hasta líneas de fabricación más grandes y complejas.

El cálculo de métricas requiere alguna aplicación de fórmulas matemáticas, y también tener datos sobre las operaciones de producción. Si no tiene acceso a estos datos, se recomienda encarecidamente que comience a recopilarlos. Aunque es posible analizar sus sistemas de fabricación a través de los métodos de este capítulo o con herramientas de simulación y modelado utilizando solo valores estimados, los resultados serán más precisos con datos reales y medidos. Sin acceso a datos reales de rendimiento, identificar formas de mejorar será más conjeturas que estrategias, lo que agrega el riesgo de que se desperdicie la inversión en mejoras (en términos de tiempo o dinero). Sin embargo, los resultados de los cálculos realizados con estimaciones informadas de las cifras de rendimiento aún pueden ofrecer amplios conocimientos e identificación de grandes problemas.

Tenga en cuenta que estos métodos generalmente se refieren a los sistemas de fabricación discretos, en lugar de los continuos. Existen métodos alternativos para analizar procesos continuos como la producción química o el procesamiento de materiales.

4.2.2 Tasa de producción

La *tasa de producción* es el número de piezas de trabajo que un proceso de producción específico puede producir por hora. Calcular esto permitirá comprender cuánto tiempo llevará producir un pedido, los niveles de utilización del sistema y dónde podrían existir cuellos de botella. La capacidad de producción de toda la línea de fabricación se discutirá en la sección 4.2.3. La tasa de producción de un proceso se puede calcular con unos pocos pasos cortos, comenzando con la determinación del tiempo de ciclo y luego calcular la tasa de producción en función de la estrategia de procesamiento por lotes. Los cálculos deben basarse en datos reales medidos para obtener los mejores resultados, pero las medidas aproximadas podrían utilizarse como primera estimación.

El primer paso para calcular la tasa de producción es comprender los *tiempos de ciclo*. Sin embargo, para calcular el tiempo de ciclo, primero debe identificar cuáles son las piezas de trabajo que produce el proceso.

- *Pieza de trabajo*: La pieza discreta o producto fabricado por el sistema de producción.

Estos pueden ser productos completos o piezas dependiendo del contexto. Por ejemplo, una línea de producción puede fabricar relojes enteros, haciendo que cada reloj sea una pieza de trabajo. Alternativamente, el sistema de producción de la compañía solo podía fabricar la carcasa del reloj como proveedor de un fabricante de relojes, convirtiendo esas carcasas en las piezas de trabajo. Las piezas de trabajo se abrevian típicamente como *pc* (piezas).

- *Tiempo de ciclo*: El tiempo que una pieza de trabajo tarda en realizar una sola operación en ella.

Por ejemplo, el tiempo que se tarda en fresar la carcasa del reloj en un centro de mecanizado es un tiempo de ciclo. El tiempo que lleva pulir la carcasa después del fresado también tendrá un tiempo de ciclo.

Esto se expresa como un tiempo, típicamente minutos (*m*). Para calcular el tiempo de ciclo, se requieren tres informaciones:

1. *Tiempo de operación* (T_o): El tiempo que una pieza de trabajo realmente pasa en procesarse.
2. *Tiempo de manipulación* (T_h): El tiempo que una pieza de trabajo pasa siendo cargada y descargada del proceso de producción.
3. *Tiempo de herramientas* (T_t): El tiempo *promedio* necesario para configurar las herramientas para la operación, incluido el reemplazo de las herramientas desgastadas. Una herramienta no necesita ser reemplazada para cada parte, por lo que el tiempo que toma debe ser promediado.

El tiempo de ciclo es la suma de estas tres veces.

*Tiempo de ciclo = Tiempo de operación + Tiempo de manipulación
+ Tiempo de herramienta*

$$T_c = T_o + T_h + T_t \quad (4.2.2)$$

Por ejemplo, una carcasa de reloj que tarda 5 minutos en fresar, 1 minuto en cargarse en la máquina, 30 segundos en descargarse de la máquina y requiere 10 minutos en reemplazar la cabeza del molino cada 50 tripas tendría un tiempo de ciclo de 402 segundos o 6,7 minutos.

Cuando haya calculado el tiempo de ciclo para un proceso involucrado en la creación de la pieza de trabajo, se puede calcular la tasa de producción.

- *Tasa de producción:* El número de piezas de trabajo producidas por un proceso de producción por hora (pc / hora).

Dado que se ha calculado el tiempo de ciclo de un proceso de producción, se podría suponer que la tasa de producción es simplemente el número de ciclos que caben en una hora. Pero esta es una aproximación que ignora los aspectos de cómo una empresa agrupa sus trabajos, lo que puede tener un impacto significativo en la tasa de producción. Hay cuatro estrategias para la producción que se consideran aquí. Estos son:

- *Lote-unitario:* Cada producto que es manufacturado es único, y requerirá el proceso de fabricación ser puesto específicamente para cada producto cada vez. Esto se encuentra en el extremo final de la personalización, y el costo y el tiempo de la configuración aumentarán significativamente el costo de producción del producto.
- *Procesamiento por lotes secuencial:* Agrupar productos similares en lotes, pero cada producto aún debe procesarse individualmente. Esta es la estrategia más común para la fabricación y ayuda a reducir los costos de configuración.
- *Procesamiento por lotes simultáneo:* Una especialización del procesamiento por lotes secuencial, el procesamiento por lotes simultáneo utiliza procesos que pueden permitir que múltiples piezas de trabajo se procesen simultáneamente, como el tratamiento térmico.
- *Producción en masa:* Cuando una empresa fabrica piezas en volúmenes muy altos, los costos de los tiempos de configuración se vuelven tan bajos que pueden ignorarse de manera efectiva. Esto requiere un producto que casi nunca cambia y tiene una gran demanda.

Cada método de producción tiene un método ligeramente diferente para calcular la tasa de producción, que se detallan en las siguientes secciones.

4.2.2.1 Tamaño de lote de uno

En el extremo final de la personalización, la tasa de producción de *tamaño de lote unitario* está dominada por los tiempos de cambio y configuración entre los diferentes productos que se fabrican. Una empresa que se especializa en la producción de talleres de trabajo puede encontrarse tratando con pequeñas cantidades de un producto para fabricar, y los puntos únicos no están fuera del ámbito de la posibilidad. El tiempo de producción para un solo artículo es la suma de dos cosas:

1. *Tiempo de configuración (T_{su})*: El tiempo que se tarda en configurar el proceso de producción para la pieza de trabajo única. Por ejemplo, cargar el programa CNC requerido y ajustar las abrazaderas para sostener las piezas de trabajo en una fresadora.
2. *Ciclo (T_c)*: Ecuación 4.2.2 , el tiempo para procesar una sola pieza de trabajo.

$$\begin{aligned} & \textit{Tiempo de producción para un solo artículo} \\ & = \textit{Tiempo de configuración} + \textit{Ciclo} \end{aligned}$$

$$T_p = T_{su} + T_c \quad (4.2.3)$$

La tasa de producción (R_p) es entonces cuántos productos se pueden hacer en una hora. Estas ecuaciones suponen que todos los tiempos se expresan en minutos.

$$\begin{aligned} \textit{Tasa de producción} &= \frac{60}{\textit{Tiempo de producción para un solo artículo}} \\ R_p &= \frac{60}{T_p} \end{aligned} \quad (4.2.4)$$

Por ejemplo, una pequeña empresa fabrica carcasas de relojes a medida. Cada carcasa tarda un promedio de 10 minutos en fresar, pero también tarda 20 minutos en configurar la fresadora para cada carcasa única. Usando la ecuación 4.2.3, el tiempo de producción es por lo tanto 30 minutos por la cubierta, y la tasa de producción de la fresadora para las cubiertas a medida es 2 pc/hr en promedio.

4.2.2.2 Procesamiento por lotes secuencial

El *procesamiento por lotes* es un enfoque extremadamente común para la fabricación, donde una empresa fabrica una cantidad fija de productos idénticos antes de cambiar los procesos de producción a un nuevo tipo de producto. Esto minimiza el impacto del tiempo de cambio, al tiempo que permite cambiar los productos. La mayoría del procesamiento por lotes es un *procesamiento por lotes secuencial*: los productos se procesan por lotes pero aún se procesan individualmente. Para calcular el tiempo requerido para procesar un lote completo en una máquina de producción (T_b), se requieren tres piezas de información:

1. *Tiempo de configuración (T_{su})*: El tiempo que se tarda en configurar el proceso de producción para procesar los productos en el lote. Por ejemplo, cargar el programa CNC requerido y ajustar las abrazaderas para sostener las piezas de trabajo en una fresadora.
2. *Ciclo (T_c)*: Ecuación 4.2.2, el tiempo para procesar una sola pieza de trabajo.
3. *Cantidad por lotes (Q)*: El número de artículos en el lote, después de lo cual el proceso se cambiará para el siguiente lote.

Tiempo de procesado del lote = Tiempo de configuración + (Ciclo \times Cantidad por lotes)

$$T_b = T_{su} + (T_c Q) \quad (4.2.5)$$

El tiempo medio por pieza de trabajo (T_p) se calcula dividiendo el tiempo de procesamiento por lotes (T_b) por la cantidad de lote (Q):

$$\textit{Tiempo medio por pieza de trabajo} = \frac{\textit{Tiempo de procesado del lote}}{\textit{Cantidad por lotes}}$$

$$T_p = \frac{T_b}{Q} \quad (4.2.6)$$

La aplicación de la ecuación 4.2.4 permitirá el cálculo de la tasa de producción por hora.

Se puede ver que cuanto mayor sea el lote, menor será el impacto del tiempo de configuración, ya que se extiende sobre un mayor número de productos. La optimización de la estrategia de procesamiento por lotes es importante para minimizar el coste de cada pieza de trabajo.

Por ejemplo, considere una empresa que está fabricando una serie de carcasas de relojes como proveedor de una empresa. Quieren fabricar 100 tripas. El tiempo de ciclo es de 10 minutos y el tiempo de configuración es de 120 minutos. La compañía quiere dividir el pedido en dos lotes para permitirles producir otros artículos entre estos lotes para cumplir con sus otros plazos de pedido. Por lo tanto, cada lote de 50 tendría un tiempo de procesamiento por lotes de 620 minutos y una tasa de producción de 4.84 pc / hr.

Alternativamente, si la empresa organizara su programación para ajustar las 100 tripas en un solo lote, la tasa de producción sería de 5.35 pc / h, una mejora del 10.5% con respecto a la estrategia de dos lotes. Depende de la compañía determinar la mejor manera de agrupar sus productos sin dejar de entregar los pedidos a tiempo.

4.2.2.3 Procesamiento por lotes simultáneo

No todo el procesamiento por lotes debe ocurrir secuencialmente como el fresado. Algunos procesos por lotes pueden ocurrir *simultáneamente*, como componentes de tratamiento térmico o galvanoplastia. Por lo tanto, el cálculo de la tasa de producción para un proceso que permite el procesamiento simultáneo se realiza de manera diferente al procesamiento secuencial. El mismo método se usa como para el procesamiento por lotes secuencial, pero reemplaza la ecuación 4.2.5 con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de procesado de lote} \\ = \text{Tiempo de configuración} + \text{Tiempo del ciclo} \end{aligned}$$

$$T_b = T_{su} + T_c \quad (4.2.7)$$

Como puede verse, el tiempo de procesamiento ya no depende del tamaño del lote, suponiendo que todo el lote se pueda procesar en un solo ciclo. Sin embargo, la cantidad de lote sigue siendo necesaria para la ecuación 4.2.6.

Considere la compañía que hace lotes de cubiertas de relojes. Electrochapan las tripas en plata, en lotes de hasta 50. El galvanoplastia tiene un tiempo de ciclo de 60 minutos. El tiempo de configuración es de 20 minutos. El tiempo de procesamiento por lotes sería de 80 minutos. Y si el proceso se ejecuta en el tamaño máximo de lote de 50, el tiempo de producción por unidad de trabajo sería de sólo 1,6 minutos, dando una tasa de producción de 37,5 pc/hr. Es posible que la empresa no pueda fresar las carcasas lo suficientemente rápido como para tener un alto grado de utilización para su proceso de galvanoplastia a menos que compren múltiples fresadoras.

4.2.2.4 Producción en masa

La producción en masa es una situación en la que una empresa nunca deja de producir un solo producto, ya que la demanda del producto es lo suficientemente grande como para que un proceso de producción dedicado sea financieramente viable. En esta circunstancia, el impacto del tiempo de configuración es insignificante. La tasa de producción en masa (R_{mp}) es entonces simplemente el número de piezas de trabajo que un proceso puede producir por hora:

$$\begin{aligned} \text{Masa - Tasa de producción} &= \frac{60}{\text{Tiempo del ciclo}} \\ R_{mp} &= \frac{60}{T_c} \end{aligned} \quad (4.2.8)$$

Un importante fabricante de relojes produce casos para su producto más popular de forma continua, incluyendo un proceso de fresado. Aunque el proceso

de fresado tardó en configurarse originalmente, el tiempo que esto tomó dividido por las decenas de miles de piezas producidas desde entonces es una pequeña fracción de segundo y puede ignorarse.

Tenga en cuenta que aunque se puede ignorar el tiempo de configuración, los tiempos de manipulación y los tiempos de herramientas en la ecuación 4.2.2 no se pueden ignorar y afectarán el tiempo de ciclo del proceso.

4.2.3 Capacidad de producción

Mientras que la sección 4.2.2 se refería a la tasa de producción esperada de procesos individuales y piezas de equipo por hora, esta sección analiza la capacidad de producción global que el equipo permite a la empresa alcanzar. Esto representa el número máximo de piezas de trabajo que se pueden fabricar en un período de tiempo, como piezas por día, semana o año.

Comprender la tasa de producción máxima posible que puede alcanzar con una línea de producción u otro conjunto secuencial de procesos es importante por varias razones. Asegura que los trabajos no se asignen en exceso a una instalación, ya que esto resultaría en plazos y retrasos incumplidos. También ayuda a comprender la utilización de los procesos de producción e identificar áreas infrautilizadas donde se podría obtener más valor.

4.2.3.1 Horas de funcionamiento de la producción

En la sección 4.2.2 se calculó el número de piezas de trabajo que pueden ser producidas por piezas individuales de equipo por hora. El siguiente paso para comprender la capacidad de producción es comprender cuántas horas al día está operando el proceso de producción. Algunas compañías trabajan un solo turno los días de la semana. Otros pueden acercarse las 24 horas del día, los 7 días de la semana. Comprender esto es el primer paso para calcular la capacidad de producción.

Las horas de operación de producción por año (suponiendo que todos los turnos tengan la misma duración) se calculan por:

$$\text{Horas de producción} = \text{Numero de turnos} \times \text{Duración del turno} \times \text{Días a la semana} \times \text{Semanas al año} \quad (4.2.9)$$

Por ejemplo, una empresa que opera un solo turno de 8 horas de lunes a viernes y opera 50 semanas al año tiene 2000 horas de producción por año. Una compañía diferente que opera dos turnos de 8 horas 7 días a la semana, 50 semanas al año tendría 5600 horas de producción por año.

Para aproximar las horas de producción por día o por semana, divida la producción por año entre 365 o 52 respectivamente. Es posible que las cifras deban

ajustarse si está calculando para un período que incluye unas vacaciones de Navidad, por ejemplo.

4.2.3.2 Capacidad de producción simple

En muchos casos, una empresa tiene una cantidad de máquinas y producen piezas a un ritmo aproximadamente similar. Por ejemplo, una empresa tiene cinco fresadoras que producen carcasas de relojes, y cada máquina produce a una tasa de producción similar. En este caso, el cálculo de la capacidad de producción de la instalación se puede calcular con la siguiente información:

1. *Número de máquinas (n)*: El número de máquinas similares en la empresa que producen piezas aproximadamente a la misma velocidad.
2. *Horas de producción (H_{pc})*: El número de horas durante las cuales se calculará la capacidad de producción, calculada con la ecuación 4.2.9. Las horas por semana o por mes se pueden utilizar aquí para calcular la capacidad de producción para períodos de menos de un año.
3. *Tasa de producción (R_p)*: El número de piezas de trabajo que cada máquina produce por hora. Esto se calcula utilizando los métodos de la sección 4.2.2 , específicamente la ecuación 4.2.4.

Capacidad de producción = Número de maquinas × Horas de Producción × Tasa de producción

$$PC = nH_{pc}R_p \quad (4.2.10)$$

Por ejemplo, la compañía con cinco fresadoras similares opera un turno de ocho horas cinco días a la semana, 50 semanas al año. Las fresadoras tienen una tasa de producción de 4.84 pc / hr. Por lo tanto, esta empresa opera 2000 horas al año y tiene una capacidad de producción anual máxima de 48,400 pc / año.

4.2.3.3 Capacidad de producción avanzada

Para situaciones en las que diferentes piezas de equipo operan a diferentes tasas de producción (PR), se utiliza una modificación de la ecuación 4.2.10. En cambio, la tasa de producción de cada máquina individual debe considerarse por separado:

- *Tasa de producción de la máquina (R_{pi})*: para un conjunto de *n* máquinas, la tasa de producción de una específica. Esto se calcula utilizando los métodos de la sección 4.2.2 , específicamente la ecuación 4.2.4.

$$\begin{aligned} \text{Capacidad de producción} \\ &= \text{Horas de producción} \\ &\times (\text{PR de la máquina 1} + \text{PR de la máquina 2, etc}) \end{aligned}$$

$$PC = H_{pc} \sum_{i=1}^n R_{pi} \quad (4.2.11)$$

Considere una empresa con tres fresadoras. Todos ellos producen carcasas de relojes, pero operan a diferentes velocidades debido a ser diferentes modelos de diferentes fabricantes. Las máquinas están numeradas, sus tasas de producción se calculan individualmente según la sección 4.2.1, y los resultados se ponen en una tabla a continuación:

Número de máquina	Nombre maquina	Tasa de producción
1	Fresadora 1	4 pc/hr
2	Fresadora 2	3 pc/hr
3	Fresadora 3	6 pc/hr

Tabla 4.2-1 Las fresadoras disponibles para el fabricante de la carcasa del reloj.

La compañía trabaja 2000 horas por año. Su capacidad de producción semanal es por lo tanto:

$$\begin{aligned} & \text{Capacidad de producción semanal} \\ &= \frac{\text{Horas de producción anuales}}{\text{Semanas al año}} \times (R_{p1} + R_{p2} + R_{p3}) \end{aligned}$$

$$PC \text{ semanal} = \frac{2000}{52} \times (4 + 3 + 6)$$

$$PC \text{ semanal} = 38.46 \times 13$$

$$PC \text{ semanal} = 500 \text{ pc/semana}$$

4.2.4 Información sobre la capacidad

La recopilación de datos y el procesamiento de los cálculos para estaciones de producción individuales es simplemente el primer paso para analizar los procesos de fabricación. Es importante mirar los resultados y entender lo que le está diciendo. Esto permitirá a un ingeniero de fabricación tomar mejores decisiones sobre su negocio, mejorando la productividad y la rentabilidad. Es especialmente preocupante hacer coincidir la capacidad de producción con la capacidad requerida. El incumplimiento de la capacidad de producción requerida provocará retrasos en los pedidos. Tener una capacidad de producción no utilizada representa equipos no utilizados que de otro modo podrían producir valor para la empresa.

Una empresa no puede fabricar más piezas por período de tiempo que su capacidad de producción calculada. Si la cartera de pedidos requiere tasas superiores a su capacidad de producción, la empresa debe aumentar la capacidad de

producción o correr el riesgo de retrasos en los tiempos de entrega. Del mismo modo, hacer menos piezas que la capacidad de producción implica que la empresa podría estar generando más valor. Si el equipo está inactivo, no está generando tantos ingresos como podría ser.

Hay muchas maneras de ajustar la capacidad de producción hacia arriba o hacia abajo según sea necesario, algunas que pueden ser consideraciones a corto plazo, y otras que son a más largo plazo. Es importante considerar las escalas de tiempo involucradas. En esta sección, describimos algunas opciones para aumentar la capacidad o mitigar el exceso de capacidad a corto, mediano y largo plazo.

4.2.4.1 Aumento de la capacidad

Cuando una empresa necesita producir más piezas de trabajo de las que tiene la capacidad de entregar, hay una serie de opciones disponibles. Qué opción se elija dependerá de cuánto tiempo la empresa espera estar sobre la capacidad para.

- *Aumentar las horas trabajadas por turno* [Corto Plazo]: Para problemas de capacidad a corto plazo, una de las formas más simples es aumentar la capacidad de producción es pedir a los trabajadores existentes que trabajen horas extras en sus días laborables existentes. Esto aumentará los costos laborales, especialmente si la empresa necesita ofrecer una mejor remuneración por hora para incentivar trabajar horas extras, pero esto es rápido y simple de implementar.
- *Reutilizar equipos existentes* [Corto Plazo]: Cuando una empresa tiene múltiples líneas de producción y fabrica múltiples productos, cambiar algunos equipos de un proceso a otro es una forma de aumentar la capacidad de producción. La disponibilidad de herramientas para hacer esto, o el tiempo requerido para reconfigurar y / o reprogramar el equipo determinará la velocidad de este enfoque, pero a menudo es corto en comparación con otros enfoques. Esto también puede incluir el traslado de trabajadores de una línea a otra.
- *Pedidos de almacén* [Corto plazo]: Dependiendo de la naturaleza de los pedidos y la relación de la empresa con el cliente, retrasar deliberadamente los pedidos durante períodos cortos de exceso de capacidad puede ser menos dañino financieramente que agregar más trabajadores o equipos. El efecto sobre la reputación de la empresa debe ser considerado.
- *Subcontratar trabajo* [Corto Plazo]: Si se espera que el período de exceso de capacidad sea corto, y retrasar la entrega de productos no es una opción, subcontratar parte del trabajo a otras empresas puede ser una solución. Esto puede ayudar a corregir los cuellos de botella en el proceso de fabricación y mejorar la capacidad de producción general, pero tenga cuidado con el aumento de los costos y los gastos generales relacionados con la organización del subcontrato.
- *Aumentar el número de turnos por día / semana* [Medio plazo]: Si es probable que los problemas de sobrecapacidad continúen más allá del corto plazo,

establecer un cambio adicional para maximizar los tiempos de procesamiento de la máquina puede ser una opción.

- *Aumentar la tasa de producción de los procesos de cuello de botella* [Medio plazo]: El proceso limitante de una línea de fabricación es el cuello de botella. Mejorar la tasa de producción de ese proceso mejorará la tasa de producción de toda la línea de producción. Esto podría implicar el reciclaje de los operadores, la optimización de los programas CNC, la mejora de las herramientas u otras mejoras técnicas.
- *Comprar equipo adicional* [Largo Plazo]: Si existe una oportunidad real de aumentar los ingresos al aumentar la capacidad de producción, la adquisición de más equipo (o más trabajadores manuales) puede ser la opción ideal. Tenga en cuenta los plazos de entrega potencialmente largos en los equipos y que será difícil obtener un rendimiento optimizado de los nuevos equipos hasta que los empleados tengan experiencia en su uso. Enfoque la adquisición de equipos en procesos de cuello de botella, ya que estos permitirán mayores capacidades de producción.
- *Rediseño del proceso de fabricación* [A largo plazo]: Si se ha producido una línea de productos durante un largo período de tiempo sin cambiar la forma en que se fabrica, se podrían lograr posibles eficiencias cambiando el proceso de fabricación y aprovechando la nueva experiencia y el equipo. También considere si algún grado de rediseño del producto podría mejorar las tasas de producción.

4.2.5 Mitigación de la capacidad no utilizada

Cuando exista mucha más capacidad de producción de la que se está utilizando, se podría lograr un ahorro de costes reduciendo la capacidad de producción de una instalación o línea de producción. Alternativamente, se podrían adoptar estrategias para hacer uso de la capacidad inactiva, creando valor a partir de sus activos.

- *Reutilizar equipos existentes* [Corto Plazo]: Cuando una empresa tiene múltiples líneas de producción y fabrica múltiples productos, si la demanda de un producto es baja, considere reutilizar equipos para otros productos donde la demanda es mayor. Esto también puede incluir el traslado de trabajadores de una línea a otra.
- *Generación de Stock* [A corto plazo]: Si la falta de capacidad es temporal, y la empresa fabrica productos que saben que continuarán vendiéndose en el futuro, ¿es posible utilizar la capacidad no utilizada para acumular inventario que ayudará a suavizar los períodos de exceso de capacidad más adelante. Esto es efectivamente juego contra la demanda de los productos, ya que el inventario almacenado no tiene valor hasta que se vende.
- *Reducir el número de turnos por semana* [A corto plazo]: Una de las formas más simples (y menos populares) de abordar la capacidad de mano de obra no utilizada es reducir la fuerza de trabajo. Esto podría significar implementar redundancia para los trabajadores, pero una alternativa es reducir el número de turnos. Los trabajadores pueden aceptar un cambio de una semana de cinco días

a una semana de cuatro días si eso significa sobrevivir a un período a corto plazo con un número bajo de pedidos sin despedir a nadie permanentemente.

- *Asumir trabajo adicional* [Medio plazo]: Si la capacidad de producción no se utiliza, considere ofrecerla como capacidad subcontratada a otras compañías. La capacidad de hacer esto se basa en la relación con otros fabricantes y la naturaleza de la capacidad de repuesto, pero asumir trabajo adicional puede crear valor a partir de equipos inactivos.
- *Vender equipos* [A largo plazo]: Si es poco probable que se utilice el equipo a mediano y largo plazo, puede valer la pena reclamar parte del valor del equipo vendiéndolo, lo que a menudo puede ser un retorno significativo. La capacidad de vender equipos y el precio por el que se vende depende de la demanda de ese equipo. Considere cuidadosamente los requisitos futuros esperados y el valor del equipo antes de comprometerse a vender.

4.2.5.1 Cuellos de botella

Muchas plantas de fabricación no fabrican productos de una sola etapa, como la carcasa del reloj descrita en las secciones anteriores, donde las tripas solo tienen un proceso aplicado a ellas. En su lugar, se ejecutan varias operaciones en secuencia para producir la pieza, formando una línea de producción. Una línea de producción puede no ser una entidad física en la planta de producción, sino un proceso seguido utilizando múltiples piezas distribuidas de hardware en su lugar, pero el enfoque es el mismo.

Sin embargo, el cálculo de la capacidad de producción de una línea de fabricación se simplifica con un solo problema: en casi todas las líneas de fabricación hay un cuello de botella. El cuello de botella es el proceso que limita la capacidad de producción, produciendo más lento que cualquier otro proceso. Al calcular las tasas de producción de cada proceso, puede identificar el cuello de botella como la máquina (o conjunto de máquinas) con la tasa de producción sumada más baja. El cálculo de la capacidad de producción de toda la línea de fabricación es simplemente la capacidad de producción del proceso de cuello de botella.

Por ejemplo, el fabricante de relojes fresa las cubiertas de relojes con 2 fresadoras a una velocidad de 5 pc / hr por máquina, las electrochapa por lotes a una velocidad de 20 pc / hr y pule las cubiertas a una velocidad de 6 pc / hr. Las dos fresadoras pueden producir juntas 10 casos por hora, el proceso de galvanoplastia puede electrochapar 20 por hora, pero el cuello de botella es el proceso de pulido. Puede aumentar las tasas de producción del fresado y el de galvanoplastia, pero terminará con pilas más grandes de cajas sin pulir.

Informalmente, los cuellos de botella a menudo se identifican fácilmente al observar qué equipo está constantemente en uso y qué equipo normalmente tiene grandes colas de trabajo esperando frente a ellos. Sin embargo, comprender formalmente las colas y los búferes en un sistema de fabricación puede proporcionar

información sobre la mejor manera de organizar sus procesos de fabricación y a qué velocidad ejecutarlos. La siguiente sección analiza el análisis de colas, y es altamente aplicable a la optimización del sistema de fabricación. Los sistemas de fabricación son series de sistemas conectados, ya sea como procesos de fabricación conectados para formar una línea de producción, o como proveedores conectados en una cadena de suministro para producir un producto grande o complejo. Comprender cómo se mueven y esperan los productos en estos sistemas ayudará a analizar dónde se pueden realizar optimizaciones para mejorar el flujo de materiales en el sistema.

4.3 Análisis de colas

4.3.1 Introducción a la teoría de colas

Cola (sustantivo): una línea o secuencia de personas o vehículos que esperan su turno para ser atendidos o para proceder.

- Oxford University Press

Buffer (sustantivo inglés): un medio o dispositivo utilizado como amortiguador contra el choque de las fluctuaciones en la actividad comercial o financiera.

- Merriam-Webster.com. 2011

La fabricación suele implicar múltiples pasos a medida que las piezas fluyen entre las estaciones de mecanizado y los procesos de ensamblaje en el taller. A menos que esté utilizando una línea de producción de flujo de impulsos donde todo se mueve entre estaciones sincronizadas, es inevitable que las piezas lleguen a las estaciones antes de que la estación esté lista, o las estaciones estarán listas antes de que las piezas estén disponibles. El uso y la comprensión de las colas y el flujo de piezas ayudarán a comprender y optimizar la línea de producción.

El proceso de fabricación implica múltiples pasos operativos, convirtiendo las materias primas en productos terminados. Con el fin de hacer que el proceso sea eficiente (por ejemplo, maximizar la tasa de producción de una línea) y rentable, se han utilizado ampliamente herramientas analíticas como la *teoría de las colas*. Juegan un papel importante en el análisis de rendimiento, diseño, planificación y control de los procesos de fabricación, ya que las piezas y los productos en las colas no están generando valor. La teoría de la cola es una rama de las matemáticas que estudia y modela el acto de esperar en líneas, y se originó en el análisis de los intercambios de telecomunicaciones que manejan las llamadas telefónicas. La teoría de la cola se ha aplicado con éxito en el modelado de líneas de producción para estudiar el rendimiento. La teoría de colas requiere simplificar los procesos en su sistema de fabricación y modelarlos para que pueda aplicar fórmulas para calcular las medidas de rendimiento. Al comprender qué afecta al rendimiento de las colas,

puede comenzar a registrar esa información y comenzar a recopilar información sobre cómo los cambios en su sistema de producción podrían afectar al rendimiento de las colas y, por lo tanto, al rendimiento general del sistema.

Para comprender cómo funciona esta teoría, primero se definen algunos componentes básicos y características de una línea de producción de fabricación y sus colas. Los sistemas de fabricación tienen diferentes diseños de flujo de producto que se clasifican según el método de transferencia de piezas y el número de tipos de piezas producidos por el sistema. La transferencia de partes se puede llevar a cabo de tres maneras diferentes:

1. *Sincrónico* (también conocido como líneas de transferencia): Donde las piezas se transportan simultáneamente entre estaciones de trabajo.
2. *Asíncrono* (también conocido como líneas de producción): Donde cada parte se mueve independientemente de otras partes.
3. *Continuo*: Donde las piezas se mueven continuamente a una velocidad constante.

Este flujo de producto es una línea o *cola de espera*, donde una secuencia de objetos (en este caso piezas fabricadas) están esperando ser procesados. Debido a los orígenes de la teoría de colas que se encuentran en el análisis de colas humanas, estos objetos generalmente se conocen como *clientes*, y el proceso que se lleva a cabo en ellos se conoce como un *servicio*. El término "*area de espera*" se usa frecuentemente en el contexto de fabricación. Una cola incluye tanto un búfer (el "área de espera") como el servicio que se alimenta del búfer, lo que en un contexto de fabricación significará el proceso de producción o la estación. En la práctica, los términos a menudo se usan indistintamente. Figura 4.3-1 muestra el diseño general del flujo de producto de los sistemas de fabricación en masa.

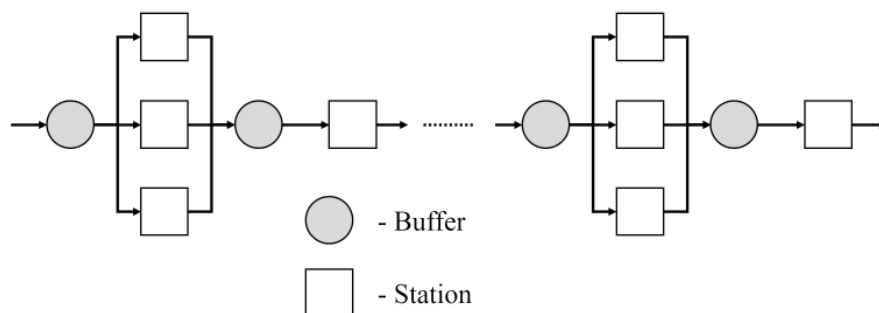


Figura 4.3-1 Disposición del flujo del producto de los sistemas de producción en masa [5]. Se puede ver que cuando hay estaciones (*station*) paralelas, esas estaciones pueden tomar partes de un solo búfer compartido.

Las líneas de producción se utilizan para producir piezas que tienen un volumen de negocios alto, y se caracterizan por un diseño de flujo de producto, baja

flexibilidad del producto (la línea se limita a producir una pequeña variedad de tipos de piezas) y transferencia de piezas asíncrona. El *bloqueo* y la *falta de piezas* son las principales causas de ineficiencia en las líneas de producción.

- *Bloqueo*: Una pieza está a la espera de ser procesada, pero no puede, ya que la máquina requerida está siendo utilizada por otra pieza.
- *Falta de piezas*: Una máquina está inactiva, ya que no tiene partes de entrada para iniciar el procesamiento.

Estos fenómenos son causados principalmente por tiempos de procesamiento variables y por interrupciones en la línea causadas por la falta de fiabilidad de las estaciones. Para aumentar la eficiencia de las líneas, se colocan colas entre las estaciones.

4.3.2 Análisis de colas

El impacto de bloquear y morir de hambre en la productividad de una línea de producción con un alto volumen de producción es significativo. Comprender las colas en su sistema también ayudará a identificar los cuellos de botella y las ineficiencias como objetivos para procesos específicos que se mejorarán. En muchos casos, simplemente ser consciente de que existen estos problemas puede recorrer un largo camino para resolver problemas intuitivamente. Sin embargo, un análisis más detallado puede permitir la identificación de problemas más sutiles e implementar enfoques de optimización más amplios. Para hacer esto, debe modelar su sistema de fabricación.

4.3.2.1 Modelado del problema

Modelo (sustantivo): una descripción simplificada, especialmente matemática, de un sistema o proceso, para ayudar a los cálculos y predicciones.

- Oxford University Press

Para entender el comportamiento de un sistema de producción, se puede analizar como un proceso estocástico (un proceso con elementos aleatorios). El principal interés se refiere a la distribución del número de puestos de trabajo en el sistema en un punto arbitrario en el tiempo. A partir de esta distribución, es posible definir cómo fluctúa el número de trabajos en el sistema, lo que permitirá el cálculo de características de rendimiento importantes, como el número medio de trabajos en el sistema. El primer paso para modelar una línea de producción es caracterizar el sistema. El sistema tiene diferentes características:

- En primer lugar, se caracteriza el proceso de *llegada* de las piezas, definiendo cómo llegan las piezas al sistema.
- Luego se caracteriza la duración del *servicio*, que es el tiempo que la pieza está en la estación donde se realizan algunas operaciones.

- También es necesario especificar el *número de estaciones*, en las que varias partes podrían procesarse en paralelo.
- Las piezas esperan en el *búfer* si todas las estaciones están ocupadas, por lo que se estima el número total de piezas en el sistema incluyendo tanto las que se están sirviendo como las que están esperando.
- Por último, es necesario especificar la directiva de *programación*. Esto determina en qué orden se liberan las partes del búfer para su procesamiento.

Las políticas de programación comunes (también llamadas disciplinas de servicio) incluyen:

- *Primero en entrar primero en salir* (FIFO): El primero en llegar, el primero en servir; el tipo de cola con el que está intuitivamente familiarizado. Como una cola de clientes en una tienda, en la fabricación la pieza que ha estado esperando más tiempo se sirve a continuación.

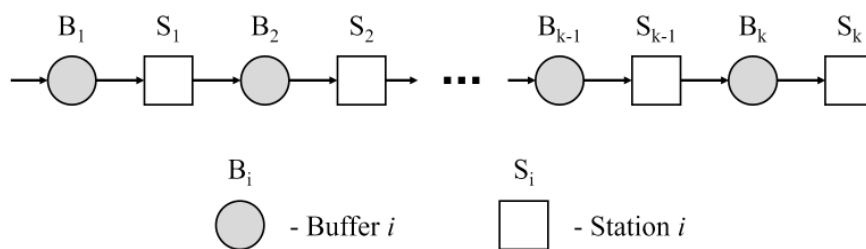


Figura 4.3-2 El modelo básico de red de cola de una línea de producción [5].

- *Último en entrar primero en salir* (LIFO): Imagina una pila de bandejas en una cantina. La bandeja principalmente reemplazada recientemente se coloca en la parte superior de la pila, y también es la siguiente bandeja que se tomará. A veces se utiliza en la fabricación donde las piezas se almacenan en búfer en una pila.
- *Prioridad*: donde no todas las partes son iguales, se puede asignar una prioridad a las partes. A los productos que deben enviarse antes se les podría asignar una prioridad más alta, y la siguiente pieza que se procesará es la pieza con la prioridad más alta asignada.
- *Tiempo de procesamiento más corto*: la parte que tardará menos tiempo en procesarse se usa a continuación. Esto a veces se usa cuando los búferes están alcanzando su límite y el espacio necesita ser despejado.

Figura 4.3-2 muestra un modelo básico común de una línea de producción. La línea de producción consiste en k estaciones dispuestas en serie. Cada estación (S_i) tiene un búfer (B_i) que lo precede. El búfer antes de la primera estación puede ser finito o infinito, todos los búferes entre estaciones son finitos. Las piezas entran en el sistema en la estación 1 y pasan por todas las estaciones en orden. En cada

estación, una sola máquina realiza una operación en cada una de las partes. Las partes salen de la estación final (S_k) en forma acabada.

Los supuestos subyacentes comunes al modelar una línea de producción como una red de colas son:

- La línea se opera en condiciones de estado estacionario (las condiciones siempre permanecen constantes a través de toda la línea de producción).
- Todas las variables aleatorias son independientes.
- Todos los tiempos de transporte entre estaciones son cero.
- Todas las fallas son fallas de una sola máquina y dependen de la operación (solo pueden fallar mientras están operando).
- No se desechan piezas.
- Solo se modela un solo tipo de pieza.
- Todos los búferes utilizan la política FIFO.
- Hay suficiente personal de reparación.

4.3.2.2 Parte Llegadas

Para modelar la línea de producción, es necesario definir la llegada continua de las piezas a una estación de trabajo determinada. En modelos simples, se supone que los tiempos sucesivos entre llegadas, $U_1, U_2, U_3 \dots U_i$ entre las partes son mutuamente independientes y que siguen la misma distribución de probabilidad.

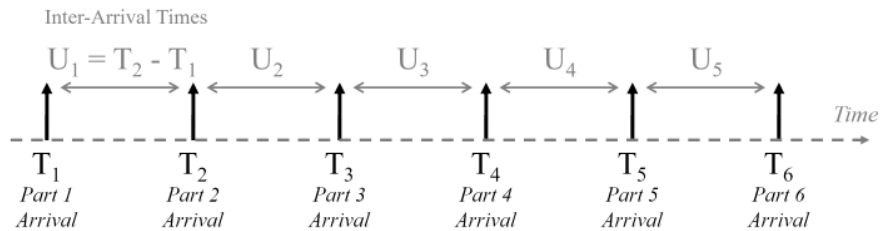


Figura 4.3-3 Llegadas de piezas. T_i es la hora de llegada para la Parte i . U_i es el tiempo entre la llegada de dos partes $U_i = T_{i+1} - T_i$

El proceso de llegada de un sistema de colas a menudo se modela como un proceso de Poisson. En este proceso, los tiempos entre llegadas $U_1, U_2, U_3 \dots$ de cada parte son independientes, y llegan según una distribución exponencial con media λ . Si está familiarizado con las distribuciones normales o las "curvas de campana", un proceso de Poisson es similar, pero es discreto (es decir, no puede tener fracciones de objetos llegando). Se describe con una sola variable – el número medio de eventos por unidad de tiempo, en este caso el número de llegadas.

Si la varianza es importante, la probabilidad de que el tiempo entre llegadas U_i sea mayor que un valor dado u es igual a $\exp(-\lambda u)$. En este caso, cuando las horas entre llegadas son independientes y se distribuyen de forma idéntica de acuerdo con

una distribución exponencial con el parámetro λ , se dice que el proceso de llegada es un proceso de tasa de Poisson λ , donde la tasa de llegada λ es el número promedio de llegadas por unidad de tiempo.

Por ejemplo, λ se expresa típicamente como el número promedio de llegadas por unidad de tiempo. Donde 12 partes llegan en una cola por hora, $\lambda = 12/h$. Al calcular el comportamiento de la cola, asegúrese de que todas las cantidades de tiempo se expresen para la misma unidad de tiempo, por ejemplo, por hora.

4.3.2.3 Duración del servicio

Para caracterizar el sistema, también es necesario definir adecuadamente la duración del servicio, que se refiere al tiempo que tarda la estación en realizar una operación en la pieza. El *tiempo de servicio* es el tiempo transcurrido entre el inicio del servicio y la salida, independientemente del tiempo de espera en la cola. Para un proceso de producción, el tiempo de servicio es equivalente al tiempo de ciclo. En general, se supone que:

- Los tiempos de servicio son independientes y están distribuidos de forma idéntica.
- Los tiempos de servicio se caracterizan por su distribución de probabilidades.

Al igual que los tiempos de llegada de partes, la distribución exponencial es un modelo común de duración del servicio. Se expresa como el número de piezas procesadas por unidad de tiempo. En este caso se supone que si S_i denota la duración del servicio para una parte i , entonces la probabilidad de que S_i es mayor que un valor dado s es igual a $\exp(-\mu s)$, donde μ es la media de la distribución exponencial y s es una duración.

Algunas métricas se pueden calcular con esta información. La *velocidad de servicio* es igual a μ y es el número promedio de piezas procesadas (es decir, servidas) por unidad de tiempo si la máquina (el servidor) siempre está ocupada, por ejemplo, piezas por minuto.

Por ejemplo, si una máquina puede procesar una pieza cada 4 minutos, $\mu = 15/h$ (es decir, 15 piezas procesadas por hora). Recuerde al calcular el comportamiento de la cola que todas las cantidades de tiempo se expresan para la misma unidad de tiempo.

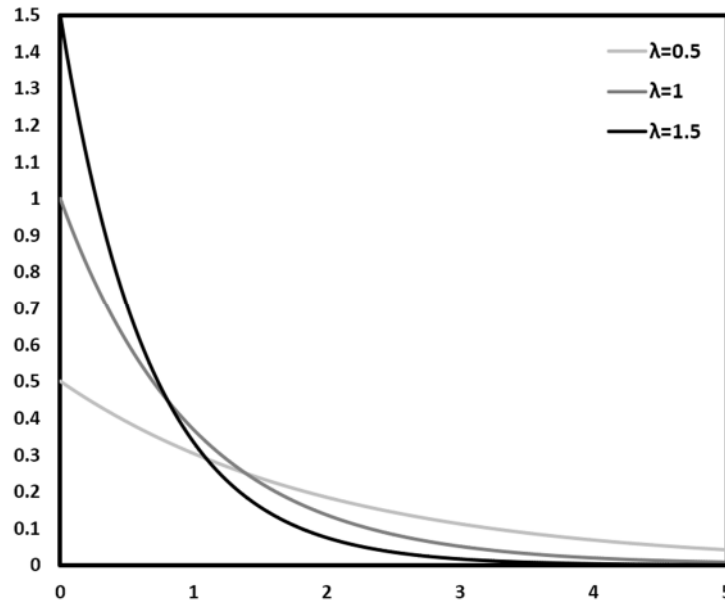


Figura 4.3-4 Tres ejemplos de distribuciones exponenciales con medias variables. En todos los casos, se puede ver que los tiempos de llegada más cortos son mucho más probables que los más largos, pero ocasionalmente se producirán tiempos de llegada largos: una parte ha llegado tarde a una estación. Estos eventos más raros suelen ser los que causan problemas con los sistemas de cola.

La *carga ofrecida* (a veces llamada intensidad de tráfico) es otra métrica importante, que representa la cantidad esperada de tráfico en una estación. La carga ofrecida ρ se define como:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (4.3.1)$$

donde λ es el número promedio de llegadas por unidad de tiempo y μ es el número promedio de partes que una estación puede manejar si siempre está ocupada. La carga ofrecida es la proporción media de tiempo que se ocupará un servidor y es un valor importante para calcular muchas métricas útiles. La carga ofrecida debe ser inferior a una. Si es mayor que uno, la estación no puede procesar partes lo suficientemente rápido, y la cola continuará creciendo para siempre.

Con nuestro ejemplo, $\lambda = 12/h$ y $\mu = 15/h$ por lo que la carga ofrecida es 0.8.

4.3.2.4 La cola M/M/1

Las diferentes clases de colas se definen utilizando la Notación de Kendall, que define las características de la cola necesarias para realizar el análisis de colas. En la notación de Kendall, se describe una cola con 5 parámetros diferentes $A/B/c/K/Z$ donde el valor para cada parámetro describe lo siguiente:

- A es la distribución del tiempo entre llegadas. M es para Markovian (es decir, exponencial como se discutió anteriormente), D es para Determinista (constante) y G es para Distribución General (es decir, una distribución desconocida). Existen otros valores para distribuciones menos comunes.
- B es la distribución de tiempo de servicio, y generalmente puede tener los mismos valores que la distribución entre llegadas.
- c es el número de servidores que toman partes de la cola.
- K es la capacidad del sistema, es decir, la longitud máxima de la cola, más el número de servidores. Por esta razón, a veces se escribe como $K + c$. Si se omite el valor, la cola es infinita.
- Z es la disciplina de servicio, por ejemplo, FIFO, LIFO, Prioridad. Cuando esto se deja en blanco, se supone que la disciplina es FIFO.

El tipo de cola más simple y el que se analiza en esta sección es la cola M/M/1, que es una cola con duraciones de llegada y servicio de Markov, un único servidor para procesar piezas y una cola sin longitud máxima. Una cola M/M/1 podría escribirse más completamente como M/M/1/∞/FIFO.

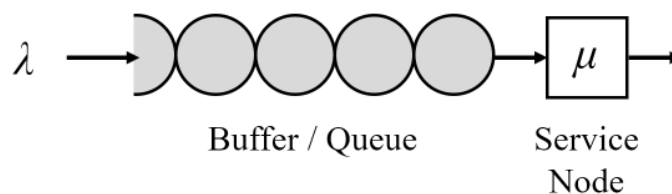


Figura 4.3-5 Una cola M/M/1 de ejemplo.

Aunque en realidad un sistema de producción nunca sería tan simple como este modelo, contiene la mayoría de las características esenciales de un sistema de producción y muestra las ideas y métodos básicos de la teoría de colas. Al simplificar el modelo, es posible crear conclusiones "lo suficientemente buenas" sin que el proceso para llegar a las conclusiones sea tan complejo como para dejar de ser útil.

El análisis del sistema consiste en estudiar la evolución del valor $N(t)$, que se refiere al número de partes en el sistema N en el momento t . "Parte en el sistema" es el número de partes en la cola, más las partes que se procesan activamente. El valor de $N(t)$ puede cambiar de dos maneras diferentes durante un período de

tiempo, representando una transición de $N(t)$ to $N(t+\Delta t)$. Si hay n partes en el sistema, pueden ocurrir los siguientes cambios:

- Si se produce una llegada, el estado del sistema aumenta de n a $n + 1$. La tasa de aumento está representada por λ , la tasa de llegada.
- Si se completa un proceso, el estado del sistema disminuye de n a $n-1$. La tasa de disminución está representada por μ , la tasa de servicio.

Predecir el valor de $N(t)$ le permite predecir la longitud promedio de la cola modelada, así como la proporción del tiempo que la cola está sobre una longitud específica. Aunque una cola $M/M/1$ tiene una cola "infinita" para simplificar los cálculos, el sistema real que se está modelando tendrá un límite que no desea exceder. La transición de un estado a otro puede tener lugar como se muestra en la Figura 4.3-6 .

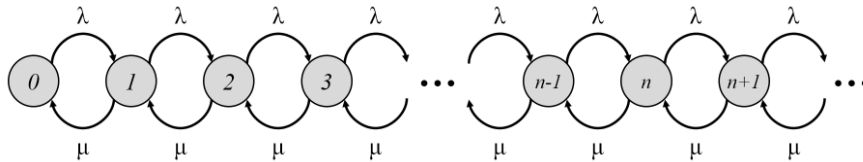


Figura 4.3-6 Estados de una cola $M/M/1$.

4.3.3 Probabilidades de eventos y medidas de rendimiento

Después de modelar la cola, puede comenzar a calcular las probabilidades de que ocurran eventos, como el número promedio de partes en la cola y el tiempo promedio que una parte pasa en la cola. Esto permitirá identificar problemas con su sistema de colas existente, donde los búferes pueden ser demasiado grandes o demasiado pequeños, o donde un búfer corre el riesgo de exceder su capacidad. Las suposiciones hechas sobre el sistema (es decir, llegadas de Poisson, tiempos de procesamiento exponenciales, FIFO) permiten describir el estado del sistema en un punto arbitrario en el tiempo simplemente especificando el número de partes en el sistema. Sin estas suposiciones, la descripción del estado sería muy complicada y tendría que contener no solo el número de piezas en el sistema, sino también, por ejemplo, el tiempo de procesamiento residual de la pieza en servicio.

En cualquier punto dado, si el sistema está en el estado n , que es el número de partes en el sistema de cola (incluidos los nodos de servicio):

- El estado del sistema se mueve de $n-1$ a n a razón de $(P_{n-1})(\lambda)$
- El estado del sistema se mueve de n a $n-1$ a razón de $(P_n)(\mu)$

Donde P_{n-1} y P_n son las probabilidades de estar en los estados $n-1$ y n respectivamente.

Suponiendo que el sistema está en un estado estable:

$$(P_n) = (\rho)(P_{n-1}) \quad (4.3.2)$$

Donde ρ es la carga ofrecida discutida en la sección 4.3.2.3. Aunque las colas son sistemas dinámicos y cambiantes, al calcular las probabilidades de estar en cada estado se puede calcular una serie de medidas de rendimiento para dar una idea de la cola y su comportamiento esperado.

4.3.3.1 Número de piezas en las probabilidades del sistema

Para calcular las medidas de rendimiento del modelo M/M/1, primero se define la probabilidad de tener n partes en el sistema. Si conocemos la carga ofrecida según lo calculado en la sección 4.3.2.3, las probabilidades de que el sistema esté vacío y en reposo es:

$$P_0 = 1 - \rho \quad (4.3.3)$$

De la ecuación 4.3.2, las probabilidades de tener una parte en el sistema son:

$$P_1 = \rho P_0 \quad (4.3.4)$$

Es decir, las probabilidades de tener una parte en el sistema son iguales a las probabilidades de tener cero partes multiplicadas por la carga ofrecida. Entonces, de manera similar, las probabilidades de tener dos partes en el sistema son las probabilidades de tener una parte multiplicada por la carga ofrecida:

$$P_2 = \rho P_1 \quad (4.3.5)$$

Y, por extensión, las probabilidades de tener n partes en el sistema se calculan como:

$$P_n = \rho^n P_0 \quad (4.3.6)$$

Como una cola M/M/1 solo puede procesar una parte a la vez, la longitud de la cola es $n-1$ (hasta un mínimo de cero). Aunque se supone que una cola M / M / 1 es infinita, en realidad es probable que haya un límite práctico por encima del cual se producirán inconvenientes significativos o costos adicionales. Las probabilidades de que el sistema tenga n o más partes en él es igual a:

$$P_{n \text{ o más}} = \rho^n \quad (4.3.7)$$

El resultado será la proporción del tiempo que el sistema pasa con una cola igual o superior a la longitud $n-1$ (ya que una parte estará en la estación que se está procesando).

4.3.3.2 Medidas de rendimiento

Con la ayuda de las fórmulas de la subsección anterior, se pueden calcular las siguientes medidas de rendimiento:

- Número promedio de partes en la cola (L_q).
- Número medio de piezas en el sistema, es decir, la cola y la estación (L_s).
- Tiempo promedio que una pieza pasa en la cola (W_q).
- Tiempo promedio que una pieza pasa en el sistema, es decir, tiempo de cola más tiempo de procesamiento (W_s).

El número medio de piezas en todo el sistema (es decir, tanto la cola como la estación de procesamiento) L_s se calcula con la carga ofrecida ρ , ya que la carga ofrecida representa la cantidad de "tráfico" en el sistema:

$$L_s = \frac{\rho}{1-\rho} \quad (4.3.8)$$

El número promedio de partes en la cola L_q se calcula multiplicando el número promedio de partes en el sistema L_s por la carga ofrecida ρ :

$$L_q = \rho L_s \quad (4.3.9)$$

Que es equivalente a:

$$L_q = \frac{\rho^2}{1-\rho} \quad (4.3.10)$$

Una ley importante en la Teoría de Colas es la Ley de Little, y establece que el número de partes en el sistema L_s es igual a la tasa de llegada λ multiplicada por el tiempo que la parte pasa en el sistema W_s :

$$L_s = \lambda W_s \quad (4.3.11)$$

L_s y λ , esto se puede reorganizar como:

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} \quad (4.3.12)$$

Como L_s se calcula con la carga ofrecida ρ , y ρ depende de la tasa de llegada λ y la tasa de servicio μ , esto se puede simplificar aún más para ser:

$$W_s = \frac{1}{\mu-\lambda} \quad (4.3.13)$$

Tenga en cuenta que la unidad de tiempo de W_s es la misma que la unidad de tiempo de λ y μ . Si $\lambda = 12/h$ y $\mu = 15/h$, entonces $W_s = 0.333$ horas, o 20 minutos.

Por último, el tiempo que una pieza pasa esperando en la cola W_q es el tiempo total en el sistema, menos el tiempo de procesamiento. El tiempo promedio de procesamiento es igual a $1/\mu$ y, por lo tanto, el tiempo promedio de espera es simplemente:

$$W_q = W_s - \frac{1}{\mu} \quad (4.3.14)$$

$$W_q = \frac{1}{\mu - \lambda} - \frac{1}{\mu} \quad (4.3.15)$$

4.3.3.3 Ejemplo de rendimiento de cola

La teoría de la cola es una herramienta extremadamente efectiva para comprender las redes de procesos conectados, pero requiere algo de práctica y pensamiento para entender. Esta sección muestra un ejemplo trabajado de una teoría de colas aplicada a un proceso de ejemplo, que debería ayudarle a comprender cómo aplicar las fórmulas.

Para una estación de mecanizado en la línea de fabricación de carcasa de reloj, la tasa promedio de llegada de piezas es de 10 por hora. En promedio, la estación puede procesar partes con una velocidad de una parte cada cinco minutos. Supongamos que la llegada de piezas sigue una distribución de Poisson y el procesamiento de piezas en la estación sigue una distribución exponencial. Encontrar el número promedio de piezas de espera en la cola y el número promedio de piezas en el sistema. Busque el tiempo de espera promedio en la cola y el tiempo total de una pieza en el sistema. Encuentre las probabilidades de que la cola supere las diez partes de longitud, ya que esta es la más larga que puede tener la cola sin bloquear el proceso anterior.

Poisson y las distribuciones exponenciales pueden sonar complejas, pero si los tiempos entre procesos y servicios siguen una curva de campana (por lo que el tiempo promedio es común, y los tiempos mucho más altos o más bajos son poco comunes) y puede calcular un tiempo promedio, entonces probablemente caigan en esta categoría. Es la variabilidad en estos dos valores lo que hace que la teoría de las colas sea importante. Si los tiempos de llegada parciales y los tiempos de servicio fueran constantes, las colas serían totalmente predecibles. Sin embargo, el procesamiento rara vez es totalmente predecible, e incluso un corto período de tiempos de llegada de piezas cortas combinado con tiempos de servicio largos podría abrumar a un sistema de almacenamiento en búfer.

Las llegadas de Poisson, el servicio exponencial y una sola estación significan que este ejemplo sigue un modelo $M/M/1$ y podemos usar las fórmulas que hemos

aprendido. Antes de que podamos calcular las medidas de rendimiento, necesitamos calcular las tarifas de llegada y servicio, y la carga ofrecida.

- La tasa de llegada de la parte es $\lambda = 10/h$

La tasa de llegada de piezas es la frecuencia con la que las piezas llegan a la estación de procesamiento, en promedio. Es poco probable que las partes lleguen exactamente cada 6 minutos, pero en cambio algunas partes llegarán un poco más rápido, algunas llegarán un poco más lento y, más raramente, puede haber una variación más significativa. Pero el promedio es de diez partes por hora. Este es un número que tendrá que medir a partir de su línea de producción real.

- La tasa de servicio de la pieza es $\mu = 1$ en 5 minutos = 12/h

La tasa de servicio de piezas es la rapidez con que la estación de procesamiento puede procesar piezas, y también se denomina tiempo de ciclo. Al igual que las tasas de llegada de piezas, aquí damos un promedio, pero cada tiempo de procesamiento específico puede fluctuar. Una vez más, esto es algo que tendrá que medir desde la propia estación de procesamiento, recordando incluir factores como la carga y descarga de piezas, y cualquier tiempo de herramientas (ver sección 4.2.2 para algunas consideraciones aquí). Si su estación de procesamiento es capaz de procesar piezas en un tiempo constante, es decir, exactamente cinco minutos para cada pieza, las fórmulas serán ligeramente diferentes. Consulte la siguiente sección para obtener información sobre las colas M/D/1.

- La carga ofrecida ρ es por lo tanto:

$$\rho = \lambda/\mu = 10/12 = \mathbf{0.833}$$

La carga ofrecida es la tarifa de llegada de la parte dividida por la tarifa de servicio, y es una medida de cuán "ocupada" está la estación de procesamiento. Es un valor importante para los cálculos restantes. Tenga en cuenta que la carga ofrecida debe ser inferior a 1, de lo contrario la estación de procesamiento no podrá mantenerse al día con la demanda.

- El número promedio de partes en el sistema L_s es:

$$L_s = \rho / (1 - \rho) = 0.833 / (1 - 0.8333) = \mathbf{5}$$

El "sistema de colas" al que se hace referencia aquí incluye la estación de procesamiento y el búfer antes de ella. Una sola pieza en el sistema implica que la pieza se está procesando y el búfer está vacío. 5 partes aquí implica que en promedio hay una parte siendo procesada y 4 partes en el búfer.

- El número promedio de piezas en espera en la cola L_q es:

$$L_q = \rho^2 / (1 - \rho) = 0.8333^2 / (1 - 0.8333) = 0.694 / 0.167 = \mathbf{4.156}$$

Puede parecer contra intuitivo que el número promedio de piezas en espera no sea solo el número promedio de piezas en el sistema menos una, sino que esto se debe a que las piezas llegan a tiempos variables durante la operación de procesamiento de piezas (llamado "tiempo residual"), combinado con la cola a veces está vacía.

- El tiempo promedio que una pieza pasa en las W_s del sistema es:

$$W_s = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{1}{12 - 10} = \mathbf{0.5 \text{ horas}} \text{ (30 minutos)}$$

El tiempo total que pasa una pieza en la cola es la combinación del tiempo de espera y el tiempo de procesamiento. Por supuesto, esto variará considerablemente a medida que fluctúe la longitud de la cola.

- El tiempo medio de espera de una pieza en la cola W_q es:

$$W_q = \frac{1}{\mu - \lambda} - \frac{1}{\mu} = \frac{1}{12 - 10} - \frac{1}{12} = \mathbf{0.416 \text{ horas}} \text{ (25 minutos)}$$

Como se indicó anteriormente, el tiempo que una pieza pasa en el sistema es el tiempo de espera más el tiempo de procesamiento. Entonces, el tiempo que la pieza pasa esperando es solo el tiempo total del sistema menos el tiempo promedio de procesamiento.

- La probabilidad de que la cola sea igual o superior a 10 partes es:

$$P_{11 \text{ o más}} = \rho^{11} = 0.8333^{11} = \mathbf{0.135}$$

Se supone que la cola $M/M/1$ tiene un búfer de longitud infinita, ya que esto simplifica significativamente las matemáticas detrás de ella. Sin embargo, esto obviamente no es una suposición realista para los sistemas reales, por lo que una aplicación común de la teoría de las colas es calcular con qué frecuencia se excede la longitud máxima de la cola. Recuerde que P_n es el número de partes en todo el sistema (incluido el procesamiento), no solo la cola. Por lo tanto, la probabilidad de que la cola exceda 10 es la probabilidad de que el número de partes en el sistema exceda 11.

Las consecuencias de una cola que excede su límite máximo pueden variar significativamente, pero un problema común sería que la estación de producción

anterior en la línea de producción está "bloqueada", es decir, no puede emitir sus partes ya que no hay a dónde ir. Esto puede afectar negativamente a la productividad, por lo que es importante comprender si esto va a ser una ocurrencia regular o muy infrecuente. Por el contrario, un búfer de gran tamaño puede ser costoso u ocupar mucho espacio, especialmente para piezas y productos más grandes. Si los cálculos muestran que el sistema nunca requerirá un búfer tan grande, el búfer puede reducirse en tamaño o nunca comprarse en primer lugar.

4.3.4 Conclusiones de la teoría de cola

Como lo implica la notación de Kendall, las colas M / M / 1 son un solo tipo en una amplia gama de posibilidades, pero a menudo se discuten ya que son simples de calcular métricas y abarcan una gran cantidad de sistemas de colas del mundo real con solo unos pocos supuestos simplificadores. Sin embargo, no cubren todos los tipos de colas. Por ejemplo, cuando la duración del servicio es una constante conocida (por ejemplo, una operación de fresado CNC automatizada con un programa fijo), tendría una cola M/D/1. Un búfer que se alimenta en tres estaciones de procesamiento similares podría ser una cola M/M/3.

Para cada uno de estos tipos de colas existen fórmulas para calcular las medidas de rendimiento. Por ejemplo, el número promedio de partes en el sistema para una cola M/M/1 viene dado por ecuación 4.3.8:

$$L_s = \frac{\rho}{1-\rho} \quad (4.3.8)$$

En comparación, el número promedio de partes en espera en una cola M / M / c (es decir, una cola M / M con servidores c) viene dado por:

$$L_s = \frac{\rho}{1-\rho} C(c, \lambda/\mu) + c\rho \quad (4.3.16)$$

donde $C(c, \lambda/\mu)$ es igual a:

$$C(c, \lambda/\mu) = \frac{1}{1-(1-\rho)\left(\frac{c!}{(c\rho)^c}\right)\sum_{k=0}^{c-1}\frac{(c\rho)^k}{k!}} \quad (4.3.17)$$

que es claramente una situación mucho más compleja!

Aquí es donde los paquetes de simulación y modelado basados en computadora cobran importancia: ocultando y resolviendo la complejidad para los usuarios, y permitiendo el cálculo de situaciones mucho más complejas con un menor riesgo de error y menos inversión de tiempo en nombre del usuario.

4.4 Conclusión

El análisis de fabricación es una combinación de varios aspectos: comprender cómo abordar formalmente el proceso de toma de decisiones, cuál es la pregunta que se hace realmente en términos de KPI, recopilar datos para informar el proceso de análisis y finalmente realizar cálculos y modelos para encontrar una respuesta a la pregunta. Comprender el proceso es tan importante como las fórmulas y los modelos mismos, ya que una vez que se entiende el proceso, las fórmulas relevantes se pueden buscar e implementar.

Sin embargo, como se muestra al final de la sección Teoría de colas, los cálculos aparentemente simples para el análisis de fabricación pueden volverse rápidamente más complejos a medida que la situación que se está analizando se expande más allá de los pequeños ejemplos. De manera similar para el análisis de la capacidad de fabricación y la tasa de producción, cuanto más simple sea la situación, más simple será la matemática requerida. Sin embargo, los sistemas de fabricación reales rara vez son tan simples, y los cálculos requeridos pueden volverse rápidamente complejos, lentos y propensos a errores.

Aunque es importante comprender los conceptos básicos de la base matemática del análisis de sistemas de fabricación, existe una gama sustancial de herramientas informáticas para ayudar en el análisis y la toma de decisiones, eliminando u ocultando gran parte de la complejidad y permitiendo al usuario ser más preciso, productivo y más capaz de responder al cambio. El proceso de toma de decisiones, comprender y aplicar correctamente los KPI, y comprender para qué sirve una herramienta y sus limitaciones son tan importantes para las herramientas basadas en computadora como para los cálculos manuales.

El siguiente capítulo (capítulo 5) se centrará en la modelización y simulación de herramientas digitales basadas en computadora que están fuera de línea, es decir, no conectadas en tiempo real a un sistema de fabricación. El capítulo 6 discutirá el área de desarrollo de los gemelos digitales, que son herramientas de modelado conectadas directamente a sistemas físicos y actualizadas en tiempo real. También discutirá los sistemas de apoyo a las decisiones, que son herramientas para ayudar directamente en el proceso formal de toma de decisiones.

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

4.5 Referencias

- [1] R. H. Hayes and S. C. Wheelwright, *Restoring our competitive edge: competing through manufacturing* (Vol. 8), New York: Wiley, 1984.
- [2] H. A. Simon, *The new science of management decision*, Harper & Brothers, 1960.
- [3] M. Davidson, “28 Manufacturing Metrics that Actually Matter (The Ones We Rely On),” LNS Research, 9th October 2013. [Online]. Available: <https://blog.lnsresearch.com/blog/bid/188295/28-manufacturing-metrics-that-actually-matter-the-ones-we-rely-on>.
- [4] International Organization for Standardization (ISO), *ISO 22400-1:2014 Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 1: Overview, concepts and terminology*, 2014.
- [5] H. T. Papadopolous, C. Heavey and J. Browne, *Queueing theory in manufacturing systems analysis and design.*, Springer Science & Business Media, 1992.



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