



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO DE SIMULACIÓN PARA EVALUAR ESCENARIOS
EN LA PROGRAMACIÓN DE TAREAS DE PINTURA EN LA
INDUSTRIA AUTOMOTRIZ**

CASO NISSAN MOTORS IBÉRICA S.A.

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA DE SISTEMAS - INGENIERÍA INDUSTRIAL

P R E S E N T A :

ING. LUIS ANTONIO ALTAMIRANO YEPEZ

TUTOR:

DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA

2011





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. I. Soler Anguiano Francisca Irene

Secretario: M.I. Wellens Purnal Ann

Vocal: Dra. Flores De La Mota Idalia

1er. Suplente: Dr. Acosta Flores José De Jesús

2do. Suplente: Dra. Monroy Leon Cozumel Allanec

MÉXICO, CIUDAD UNIVERSITARIA

TUTOR DE TESIS:

DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA

FIRMA

A la UNAM y al programa PAPIIT IN100608

Al programa de becas del CONACYT

A mis profesores y amigos

A mis padres

A Mariana

A Santiago

La explicación es obvia: El jardín de senderos que se bifurcan es una imagen incompleta, pero no falsa, del universo tal como lo concebía Ts'ui Pên. A diferencia de Newton y de Schopenhauer, su antepasado no creía en un tiempo uniforme, absoluto. Creía en infinitas series de tiempos, en una red creciente y vertiginosa de tiempos divergentes, convergentes y paralelos. Esa trama de tiempos que se aproximan, se bifurcan, se cortan o que secularmente se ignoran, abarca todas las posibilidades.

El jardín de senderos que se bifurcan

Jorge Luis Borges

El azar es como la vida misma.

Jaime Sabines

ÍNDICE

Introducción.....	7
Justificación.....	8
Objetivo, alcances y limitaciones	9
Antecedentes.....	11
Capítulo 1. Simulación y optimación	11
1.1 Uso de la simulación.....	13
1.2 Elementos del sistema.....	17
Capítulo 2. Técnicas de programación	29
2.1 Plan agregado de operaciones	31
2.2 Programa maestro de producción.....	33
2.3 Secuenciación de los trabajos	35
Metodología	41
Capítulo 3. Simulación en manufactura	41
3.1 Características de los sistemas de manufactura	41
3.2 Uso de la simulación en manufactura	44
3.3 Paradigmas de modelado	48
Capítulo 4. Caso Nissan motors ibérica s.a.	59
4.1 Carrocería.....	61
4.3 Ensamble.....	66
Capítulo 5. Diseño del modelo	73
5.1 Elementos básicos del modelo	74
5.2 Criterios de desempeño	87
5.3 Implementación	89
Resultados	91
Análisis de la variable costo.....	91
Aplicación de la regla SOT distribuido	93
Conclusiones.....	95
Referencias	97
Apéndice A. Tablas de resultados.....	99

Introducción

La industria automotriz como todas las actividades económicas que dependen de los energéticos y la extracción de minerales, se ve inmediatamente afectada por los movimientos económicos. Es por eso que también es una industria caracterizada por estar a la vanguardia en sus sistemas productivos y dado que la estrategia operativa de una empresa es la actividad que contempla maniobras relacionadas con la forma en que se produce un bien y la eficiencia con la que se realiza (Fuentes, 2002), es en esta categoría donde se invierte mucho esfuerzo en mejorar procesos.

En general las organizaciones construyen un plan estratégico, un plan agregado de ventas y operaciones, el plan de operaciones, el programa maestro y finalmente, pasando por la planeación de requerimientos, se construye el programa de pedidos (Chase, 2009). Es en este último paso, en donde la secuenciación de los trabajos tiene mucha relevancia y donde las reglas que se siguen, impactan en los costos de producción.

Un ejemplo de mejora de procesos automotrices es el esfuerzo realizado por la sociedad francesa de investigación de operaciones y análisis de decisiones (ROADEF), quien realiza anualmente un evento llamado "ROADEF Challenge" que plantea abiertamente un reto relacionado con la industria y convoca a la comunidad académica a hacer propuestas de solución. En el caso de RADEF'2005 el tema planteado fue un problema de secuencia de tareas en la construcción de vehículos, patrocinado por Renault.

Otro ejemplo de la necesidad de los fabricantes de llevar nuevas ideas a las plantas de producción es la "Cátedra Nissan", que se realiza tanto en la escuela de negocios de la universidad de Navarra, como en la universidad politécnica de Cataluña. El objetivo de esta actividad es investigar y desarrollar en proyectos relacionados con la industria automotriz que resuelvan problemas de producción y que a la vez formen profesionistas especializados.

En 2004 Miguel Angel Piera y Antoni Guash publicaron un artículo donde presentan por medio de un caso práctico, el uso de las redes de Petri coloreadas como herramienta de modelado y optimación de sistemas logísticos. En este trabajo se plantea que la secuenciación de tareas en la industria automotriz es considerada como un problema NP (Piera, 2004) que ha sido atendido tanto por la comunidad de simulación como por la comunidad de optimación. El objetivo es encontrar una permutación que minimice una cierta función de costo mientras se cumple con todas las restricciones estructurales y operativas.

Para ilustrar lo anterior Piera y Guash describen en forma general la distribución y los procesos de la planta de armado de autos de Nissan Motors Ibérica S.A (NMISA). Incluyen información de los tres principales talleres (carrocería, pintura y armado) y sus almacenes asociados (ver figura 0.1). También plantean un modelo de simulación con redes de Petri coloreadas considerando la distribución de la planta, las transiciones de los vehículos, sus atributos y las restricciones que se deben cumplir (Piera, 2004).



Figura 0.1. Talleres y almacenes de la planta NMISA

Finalmente se llega a encontrar una secuencia que reduce los costos de producción expresados en función del costo de proceso, usando una técnica de intercambio que va evaluando el impacto que tiene en el almacén final, el elegir determinado auto en el almacén inicial.

Justificación

En el presente trabajo se ha tomado el caso de la planta NMISA planteado por Piera y Guash (Piera, 2004) y se ha buscado una forma alternativa de modelarlo sin usar redes de Petri coloreadas. En esencia, durante la búsqueda de una permutación que minimice las funciones de costo, Piera y Guash proponen introducir transiciones de autos entre los almacenes PBS y WBS (ver figura 0.1), de tal manera que se verifique si la elección de un auto fue la correcta o se corrija llevando el auto desde el almacén PBS hacia el WBS e intentando otra permutación hasta encontrar la que minimice el costo.

Con este enfoque se requiere que una aplicación de software revise el estado de los pedidos, los almacenes y cada uno de los autos que se están procesando para calcular la mejor forma de proceder en un momento dado.

Esto se debe calcular cada vez que se altere el programa de pedidos (diario o por turnos), o cada vez que surja algún problema en la producción que implique alterar la secuencia de armado.

La propuesta de este trabajo es modelar la planta de NMISA en la herramienta Promodel y aprovechar la flexibilidad del software para hacer diferentes escenarios, y encontrar no una permutación óptima, sino evaluar que disciplina o regla de prioridad es la que funciona mejor en el modelo. Con esto se busca que el personal que labora en la planta sepa como proceder en cualquier caso, y que no dependa de que alguien indique continuamente cual es la nueva secuencia que se ha de seguir.

En este enfoque cada uno de los escenarios estará caracterizado por el uso de una regla de prioridad en particular (Chase, 2009), que resultará en una permutación con un costo de producción expresado en términos del tiempo en el sistema los recursos empleados.

Objetivo, alcances y limitaciones

Desarrollar un modelo de simulación de la planta Nissan motor Ibérica, para evaluar diferentes reglas de prioridad en el proceso de pintura y encontrar cual de ellas genera la permutación más económica.

Bajo las siguientes condiciones:

- Los resultados se centran en la planta de pintura porque es la planta menos automatizada y la que tiene más impacto en el costo total
- Solo se contemplan las variables y los subprocesos de producción más relevantes
- Cada locación representa un conjunto de varios subprocesos agrupados que no se van a modelar en detalle
- Las distribuciones de las variables aleatorias fueron usadas cuando se dispuso de ellas, el resto fueron adaptadas de los resultados globales
- El modelo de simulación no va a contemplar cambios de turno ni tiempos de puesta en marcha
- De la literatura se tomaron 8 reglas de prioridad que quedaron reducidas a 4 debido a las características de implementación.
- El modelo es implementado en Promodel versión 4.0

Antecedentes

Capítulo 1. Simulación y optimización

Introducción

Las técnicas tradicionales de investigación de operaciones (IO) utilizan modelos matemáticos para resolver problemas que involucran relaciones simples o moderadamente complicadas. Estas técnicas resuelven modelos determinísticos como los de programación lineal, problemas de ruteo o problemas de redes. También resuelven modelos probabilísticos como los planteados en la teoría de colas y árboles de decisiones. Las técnicas de investigación de operaciones generan resultados cuantitativos en forma rápida sin necesidad de usar métodos de ensayo y error. Estas técnicas pueden ser divididas en dos tipos: prescriptivas y descriptivas.

Las técnicas prescriptivas de IO proveen una solución óptima a un problema. Estas técnicas incluyen la programación lineal y la programación dinámica. Generalmente se aplican cuando el único objetivo es maximizar o minimizar una función de costo.

Una limitante principal es que si un sistema requiere tomar en cuenta objetivos secundarios a maximizar o minimizar, no es fácil incluirlos. Adicionalmente, estas técnicas no permiten el uso de variables aleatorias.

Las técnicas descriptivas como la teoría de colas, proveen una buena estimación para problemas básicos como encontrar el número esperado promedio de entidades en una fila, o el tiempo de espera promedio. Sin embargo, cuando el sistema se vuelve moderadamente complejo, el modelo se torna muy complicado y matemáticamente intratable. En contraste, la simulación provee estimados muy cercanos al óptimo para sistemas complejos, además de que los resultados estadísticos de la simulación no están limitados a una o dos métricas, sino que proveen información de todas las medidas de desempeño en el tiempo (Harrell, 2003). La simulación es una forma de reproducir las condiciones de un sistema, por medio de un modelo, para estudiar su dinámica, probarlo o predecir su comportamiento. En la práctica las simulaciones se efectúan en programas de software específicamente diseñados para capturar la dinámica del sistema, además de capturar estadísticos para su posterior análisis. La simulación provee un método de análisis formal y predictivo, que es capaz de evidenciar el desempeño de los sistemas aún antes de ser construidos. También se pueden probar políticas de operación antes de ser implementadas. Esto es especialmente útil porque muchos errores comunes se encuentran en la puesta de operación de un nuevo sistema.

Las mejoras que tradicionalmente toman meses o incluso años de ajustes finos pueden ser obtenidas en términos de días o incluso horas.

Debido a que la simulación se ejecuta en tiempo comprimido, semanas de operación pueden ser simuladas en minutos o incluso en segundos. Las características de la simulación que la hacen una herramienta poderosa en la toma de decisiones pueden ser resumidas de la siguiente forma:

- Captura las interdependencias del sistema
- Modela la variabilidad
- Es lo suficientemente versátil para modelar cualquier sistema
- Muestra el comportamiento en el tiempo
- Es menos costosa, tardada e invasiva que experimentar directamente sobre el sistema estudiado
- Provee información sobre distintas medidas de desempeño
- Visualmente es más rica e interesante
- Provee resultados que son fáciles de entender y comunicar
- Corre en tiempo comprimido, real o incluso en tiempo expandido
- Captura detalles profundos de un diseño

Debido a que la simulación toma en cuenta las interdependencias y las variaciones, provee información de la compleja dinámica de un sistema que no puede ser modelada con otras técnicas de análisis. La simulación le da a los planeadores de sistemas libertad ilimitada para probar diferentes ideas de mejora sin riesgo, a bajo costo y sin interrumpir el sistema real.

En la simulación se crea un modelo que actúa como sustituto del sistema real y el conocimiento ganado puede ser transferido (Harrell, 2003). Cuando se habla de hacer una simulación se habla del proceso de diseñar un modelo, que sigue el método científico: (1) formular una hipótesis, (2) diseñar un experimento, (3) probar la hipótesis experimentalmente y, (4) obtener conclusiones acerca de la validez de la hipótesis (figura 1.1). En simulación se formula una hipótesis acerca de cuál diseño o que políticas operativas funcionan mejor. Se diseña un experimento en forma de modelo de simulación con el cual se efectúan múltiples experimentos. Finalmente se analizan los resultados y se concluye acerca de la hipótesis. Si la hipótesis es correcta se pueden realizar los cambios en el sistema real con confianza. Como se puede ver en la siguiente figura este proceso se repite hasta se llegar al resultado deseado.

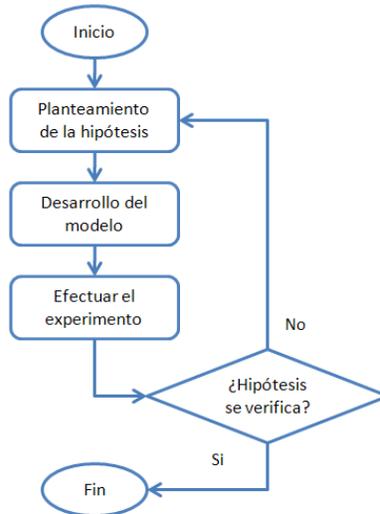


Figura 1.1. Proceso de simulación-experimentación

1.1 Uso de la simulación

La simulación comenzó a ser usada en aplicaciones comerciales desde la década de 1960. Los modelos iniciales generalmente se programaban en fortran y contenían cientos de líneas de código y no solo el desarrollo era arduo si no también su ejecución y prueba (Harrell, 2003). Frecuentemente tomaban un año o más construirlos y continuamente eran suspendidos debido a que las decisiones económicas primaban sobre el modelo. Las simulaciones largas eran corridas en lotes usando costosos mainframes.

En décadas recientes la simulación ganó popularidad como una herramienta de toma de decisiones en las industrias de manufactura y servicio. Para muchas compañías la simulación se ha vuelto una práctica común cuando se evalúa la posibilidad de instalar un nuevo nodo logístico. Esta popularidad se puede atribuir a la combinación de los siguientes elementos:

- Incremento en el conocimiento y entendimiento de esta tecnología
- Mayor disponibilidad, capacidades y facilidad de uso del software especializado
- Incremento en la potencia de las computadoras
- Baja de los costos de hardware y software

El uso primario de la simulación continúa siendo el área de manufactura, e incluye sistemas de almacenamiento y distribución. Aunque las tendencias actuales buscan estandarizar y sistematizar otros procesos de negocio como órdenes de compra, facturación, soporte a clientes, etc. Algunas aplicaciones típicas son:

- Planeación de flujo de trabajo
- Planeación de la capacidad
- Reducción del tiempo de ciclo
- Planeación de recursos y personal
- Priorización de tareas

- Análisis de cuellos de botella
- Mejoras de calidad
- Reducción de costos
- Reducción de inventarios
- Análisis de producto en procesos
- Mejoras de la productividad
- Análisis de layout
- Balanceo de líneas
- Optimización del tamaño de lote
- Planeación de la producción
- Planeación de recursos
- Agenda de mantenimiento
- Diseño de sistemas de control

No todos los problemas que pueden ser resueltos con ayuda de simulación deberían ser resueltos así. Es importante seleccionar la herramienta adecuada para cada tarea. La simulación tiene ciertas limitaciones que deben ser tomadas en cuenta (Harrell, 2003). No es la panacea para todos los problemas relacionados con sistemas. Como una guía general, la simulación es apropiada para los sistemas que cumplen los siguientes criterios.

- **Debe ser tomada una decisión operativa (lógica o cuantitativa).** Tal vez la limitación más significativa de la simulación es su restricción a asuntos operativos. Si no es tan útil resolver estos asuntos como los que involucran áreas técnicas o sociológicas la simulación no es recomendable
- **El proceso analizado esté bien definido y es repetitivo.** La simulación es útil solo si el proceso a ser modelado está bien estructurado y es repetitivo. Si el proceso no sigue una secuencia lógica y reglas definidas será muy difícil modelarlo. Esto significa que no debe haber incertidumbre en el modelo. Si un comportamiento aleatorio puede ser descrito usando distribuciones y expresiones probabilísticas, este puede ser simulado
- **Las actividades y eventos son interdependientes y variables.** Un sistema puede tener muchas actividades, pero si ellas nunca se interfieren unas con otras o son determinísticas (sin variaciones), entonces el uso de la simulación es innecesario. No es el número de actividades lo que vuelve a un sistema difícil de analizar, si no el número de interdependencias y actividades aleatorias
- **El impacto en costo de la decisión es mayor que el costo de hacer la simulación.** A veces el impacto de la decisión es tan insignificante que no justifica el tiempo ni el esfuerzo de hacer una simulación
- **El costo de experimentar en el costo real es mayor que el costo de la simulación**

Justificación económica de la simulación

El costo siempre es un asunto importante cuando se considera el uso de cualquier herramienta de software y la simulación no es la excepción. Como ya se mencionó la simulación no debe ser usada si el costo excede los beneficios, lo que significa que el costo y el beneficio deben ser cuidadosamente estudiados. El uso de la simulación generalmente se rechaza prematuramente por la incapacidad de reconocer los beneficios potenciales y los ahorros que produce, y mucho de esto reside en el prejuicio de que la simulación es costosa y se lleva mucho tiempo. Esta percepción ignora el hecho de que la simulación usualmente ahorra más tiempo y costos de los que consume. Es verdad que la inversión inicial incluye costos de entrenamiento y de puesta en marcha, sin embargo esos costos se recuperan durante los primeros proyectos y el costo de la simulación se va amortizando. Con respecto al tiempo invertido en construir la simulación, este mismo tiempo es ahorrado en la construcción de una clara definición del sistema y no necesita ser invertido de nuevo. Con las herramientas avanzadas del modelado, el desarrollo de modelo y la ejecución de simulación solo toman una pequeña fracción de tiempo de todo el desarrollo del sistema.

Los ahorros de la simulación se materializan identificando y eliminando problemas e ineficiencias que podrían ser notados hasta la implementación del sistema. Los costos también se reducen eliminando rediseños y factores excesivos de seguridad que se añaden cuando las proyecciones de desempeño son inciertas (Harrell, 2003). La simulación también elimina inversiones de capital innecesarias; descubre y corrige errores operativos.

Los ahorros reales de la simulación vienen cuando se les permite a los diseñadores manipular el modelo y cometer errores. El concepto de reducir los costos a través de manipular el modelo en tiempo de diseño en vez de hacerlo sobre el sistema ya implementado es mejor ilustrado por el principio que establece que el costo de corregir un problema se incrementa en un factor de 10 por cada etapa de diseño que pasa sin ser detectado (figura 1.2).

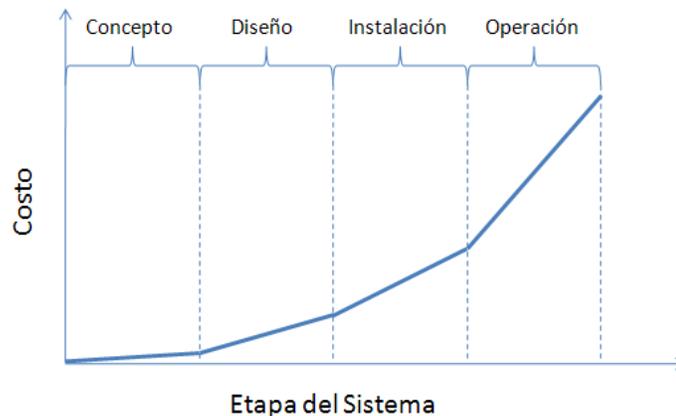


Figura 1.2. Costos de hacer correcciones en diferentes etapas

La simulación ayuda a evitar muchos de los costos asociados con malas decisiones que se transfieren durante todas las fases de desarrollo. La siguiente figura ilustra como el costo acumulado resultante de sistemas diseñados usando simulación se compara con sistemas sin simulación.

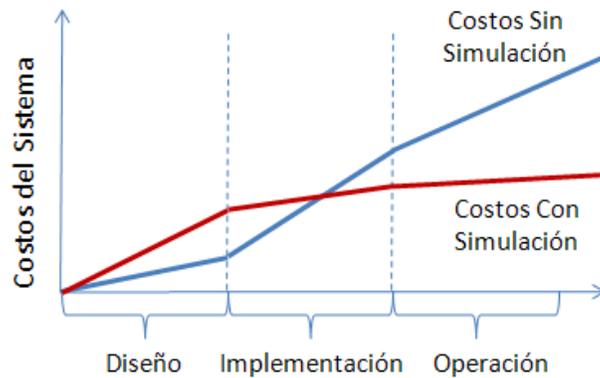


Figura 1.3. Comparación de costo acumulado con y sin simulación

Note que mientras el costo en el corto plazo puede ser ligeramente mayor debido a los costos de software y de mano de obra asociados con la simulación, los costos a largo plazo asociados con inversiones de capital y la operación de los sistemas son considerablemente más bajos debido a la mayor eficiencia lograda por la simulación (Harrell, 2003). Además el uso de la simulación basada en el criterio de costo es miope y muestra una falta de entendimiento de los ahorros a largo plazo que conlleva un sistema eficiente y bien diseñado.

La simulación también ayuda a mejorar la productividad mostrando nuevas formas de hacer mejor los recursos existentes. Observando un sistema de manera holística, algunos problemas como cuellos de botella, redundancias e ineficiencias, que originalmente estaban ocultos, pueden ser descubiertos y eliminados mediante la simulación.

La sociedad actual está compuesta de sistemas complejos hechos por el hombre y dependemos de ellos para nuestra seguridad, comodidad y supervivencia. Rutinariamente confiamos en el sistema de transporte, cuidado de la salud, producción y distribución para proveernos de bienes y servicios necesarios. Además, dependemos de la calidad, comodidad, puntualidad y costo de los bienes o servicios proveídos.

Un sistema se define como una colección de elementos que funcionan juntos para lograr una meta deseada. Los puntos claves en esta definición son: (1) el hecho de que consiste en múltiples elementos, (2) estos elementos se interrelacionan y (3) el sistema existe con un propósito específico.

Los sistemas de manufactura pueden ser pequeños talleres y células de manufactura o grandes instalaciones con líneas de ensamble. Los sistemas de almacenaje y distribución, así como los sistemas completos de cadenas de suministro están incluidos dentro de los sistemas de manufactura.

Los sistemas de servicio cubren una gran variedad incluyendo instalaciones hospitalarias, centros de atención remota, parques de diversiones, sistemas de transporte público, restaurantes y bancos. Ambos, los sistemas de manufactura y de servicio pueden ser llamados *sistemas de procesamiento*, debido a que procesan elementos a través de una serie de actividades. En un sistema de manufactura, la materia prima se transforma en un producto terminado, y en un sistema de servicio, los clientes llegan por alguna necesidad y se retiran satisfechos.

Los sistemas de procesamiento son artificiales (hechos por el hombre), dinámicos (sus elementos interactúan en el tiempo), y usualmente estocásticos (exhiben un comportamiento aleatorio).

1.2 Elementos del sistema

Desde una perspectiva de simulación, se puede decir que un sistema consiste en entidades, actividades, recursos y controles (ver figura 1.4). Estos elementos definen qué, quién, cuándo, dónde y cómo una entidad es procesada.



Figura 1.4. Elementos de un sistema

Entidades

Las entidades son elementos procesados a través del sistema tales como productos, clientes y documentos. Diferentes entidades pueden tener características únicas como costo, forma, prioridad y calidad o condición. Las entidades pueden ser subdivididas en tres tipos:

- Humanas o animadas (clientes, pacientes, etc.)
- Inanimadas (partes de un producto, documentos, contenedores, etc.)
- Intangibles (llamadas, correo electrónico, etc.)

Para la mayoría de los sistemas tanto de manufactura como de servicio, las entidades son elementos discretos, como productos terminados o clientes satisfechos.

Algunos sistemas de producción, llamados *sistemas continuos*, usan entidades no discretas, pero pueden ser procesadas como si lo fueran; por ejemplo, en refinerías de petróleo o plantas procesadoras de papel.

Actividades

Las actividades son tareas desempeñadas en el sistema, involucradas directa o indirectamente en el proceso de las entidades. Ejemplos de estas actividades incluyen el encuentro del servicio con el cliente, cortar una parte en una máquina, reparar una pieza o ensamblar el producto terminado. Las actividades usualmente consumen tiempo e involucran el uso de recursos. Las actividades pueden ser clasificadas como:

- Proceso de entidades (revisión, tratamiento, inspección, fabricación, etc.)
- Movimiento de entidades y recursos (arrastre, elevación, transporte, etc.)
- Ajuste de recursos, mantenimiento y reparación (puesta en marcha y distintos tipos de mantenimiento)

Recursos

Los recursos son aquellos por medio de los cuales las actividades son desempeñadas. Proveen instalaciones, equipo y personal para ejecutarlas. Los recursos facilitan el proceso de entidades, pero pueden representar restricciones si no se tiene el número o la calidad adecuada al limitar la tasa con la cual el proceso se lleva a cabo. Los recursos pueden tener características como capacidad, velocidad, ciclo de tiempo y confiabilidad. Se pueden clasificar en:

- Humanas o animadas (operadores, doctores, personal de mantenimiento, etc.)
- Inanimadas (equipo herramental, espacio físico, etc.)
- Intangibles (información, potencia eléctrica, etc.)

Los recursos también pueden ser clasificados como dedicados o compartidos, permanentes o consumibles, o como móviles o estacionarios.

Controles

Los controles nos dicen cómo, cuándo y dónde son efectuadas las actividades; imponen orden al sistema. En general los controles consisten en agendas, planes y políticas. En lo particular los controles adquieren la forma de procedimientos escritos o de lógica de control de maquinaria. En cualquier nivel, los controles proveen información y lógica de decisiones sobre cómo el sistema opera. Los siguientes son ejemplos de control:

- Secuencias de ensamble
- Planes de producción
- Agendas de trabajo
- Priorización de tareas
- Software de control
- Hojas de instrucción

Complejidad del sistema

Los elementos de un sistema operan de tal forma que resultan interacciones complejas, donde desafortunadamente la intuición humana no es muy buena analizándolas y entendiéndolas. En 1957 el economista Herbert Simon llamó “principio de racionalidad acotada” a la imposibilidad de la mente humana para entender la complejidad del mundo real. Este principio establece que la capacidad de la mente humana para formular y resolver problemas complejos es muy pequeña comparada con el tamaño del problema cuya solución es requerida para describir objetivamente el comportamiento del mundo real o incluso una aproximación (Harrell, 2003). La complejidad de los sistemas principalmente es función de los siguientes factores:

- Interdependencias entre elementos
- Variabilidad en el comportamiento de los elementos que produce incertidumbre

Estos dos factores caracterizan virtualmente el comportamiento de todos los sistemas hechos por el hombre y los hace difíciles de analizar y predecir.



Figura 15. Dificultad analítica como función de las interdependencias y las variables aleatorias

Interdependencias

Las interdependencias ocasionan que el comportamiento de un elemento afecte otros elementos dentro del sistema. Por ejemplo, si una máquina se descompone, el personal de reparación se pone en acción mientras que las operaciones subsecuentes se encuentran sin actividad por falta de insumos. Las operaciones previas podrían ser forzadas a parar debido al exceso de partes que pudieran producirse. Otro ejemplo en que esta reacción en cadena o efecto dominó se manifiesta es en situaciones donde los recursos son compartidos entre dos o más actividades. Un doctor que se encuentra atendiendo un paciente, por ejemplo, es incapaz de responder inmediatamente a otro paciente que requiera su atención causando un retraso y obligando a otros elementos a ponerse en acción.

La complejidad de un sistema tiene menos que ver con el número de elementos en el sistema que con el número de relaciones interdependientes. Cada interdependencia puede variar en grado, causando más o menos impacto en todo el comportamiento del sistema. Las interdependencias pueden ser fuertes o débiles, dependiendo de qué tan cerca los elementos se encuentran vinculados. Cuando un elemento como un trabajador o una máquina tienen un retraso en un sistema fuertemente acoplado, el impacto es inmediatamente resentido por otros elementos en el sistema y el proceso entero se ve afectado. En un sistema débilmente acoplado, las actividades tienen un impacto menor. El enfoque preferido para manejar las interdependencias es eliminándolas. Desafortunadamente, no siempre es posible hacerlo. La idea general de un sistema es crear una sinergia que no sería posible lograr sin alguno de los elementos involucrados. Existen varios métodos para desacoplar elementos o al menos para que cuando exista una falla, su efecto no se propague fácilmente. Por ejemplo, hacer almacenes intermedios (buffer), implementar redundancia, realizar respaldos o usar recursos dedicados a una tarea.

Variabilidad

La variabilidad es una característica inherente a cualquier sistema que involucre personas y máquinas. La combinación de incertidumbre en las entregas, fallas aleatorias en equipo, ausentismo impredecible y fluctuación de la demanda, crean caos en las operaciones del sistema de planeación. La variabilidad complementa el efecto impredecible de las interdependencias, haciendo a los sistemas aún más complejos. La variabilidad se propaga en el sistema haciendo que “las salidas altamente variables de una estación de trabajo, se vuelven entradas altamente variables de otra” (Hopp y Spearman, 2000)

TIPO DE VARIABILIDAD	EJEMPLOS
Intervalos de Actividad	Tiempos operación, reparación, puesta en marcha, desplazamiento.
Decisiones	Aceptar o rechazar una parte, direccionar pedidos, Siguiente tarea a realizar.
Cantidades	Tamaño de lote, cantidades de arribo, numero de operarios.
Intervalos eventuales	Tiempo entre arribos, entre fallos de equipo.
Atributos	Preferencias del cliente, tamaño de la parte, nivel de habilidad.

Tabla 1.1. Ejemplos de variabilidad del sistema

La tabla 1.1 identifica los tipos de variabilidad aleatoria que se encuentran típicamente en los sistemas de manufactura y de servicio. La tendencia en los sistemas de planeación es ignorar la variabilidad y calcular la capacidad y el desempeño del sistema con base en promedios. Muchas aplicaciones comerciales del tipo MRP (material requirements planning) trabajan de esta manera y distorsionando el modelo y efectuando predicciones de desempeño imprecisas.

Respecto a la variabilidad, la simulación ayuda a predecir el impacto que ésta tendrá en el desempeño del sistema. Por ejemplo, identificar el grado en que el sistema reduce el tiempo de flujo si la variación en alguna operación es reducida o eliminada.

Métricas de desempeño

Las métricas son cálculos que se usan para evaluar el desempeño de un sistema. En los niveles directivos de una organización las métricas evalúan el desempeño general en términos de utilidad, beneficios, presupuestos, retorno sobre activos, etc. Estas métricas son típicamente financieras y muestran el desempeño final. Desafortunadamente las métricas tienen un retraso inherente que enmascara el desempeño operativo de bajo nivel, además de ser reportadas periódicamente. Desde un punto de vista operativo es mejor dar seguimiento a factores como tiempo, calidad, cantidad, eficiencia y utilización. Estas métricas operativas reflejan la actividad inmediata y son directamente controlables. Las métricas clave, que describen la efectividad y la eficiencia de los sistemas de servicio y de manufactura incluyen las siguientes:

- **Tiempo de proceso (flow time).** Es el tiempo que le toma a un artículo o cliente ser procesado en el sistema. Se usan como sinónimos: tiempo de ciclo (cycle time), tiempo de rendimiento (throughput time) y tiempo de manufactura (manufacturing lead time). Para los sistemas de cumplimiento a la orden (make-to-order), el tiempo de proceso también puede ser visto como el tiempo de respuesta al cliente. Este tiempo puede ser reducido acortando los tiempos de actividad como el tiempo de puesta en marcha, de traslados, de operación y de inspección. También puede ser acortado reduciendo la cantidad de trabajo en proceso o el tiempo promedio de entidades en el sistema. Dado que más del 80% del tiempo de proceso se utiliza en líneas de espera o almacén, la eliminación de almacenes intermedios tiende a producir grandes mejoras en esta métrica. La solución obvia es adicionar recursos, pero es costosa
- **Utilización.** Es el porcentaje del tiempo planeado que el personal, el equipo y otros recursos están en uso productivo. Si un recurso no está siendo utilizado, puede estar ocioso, bloqueado o descompuesto. Para incrementar la utilización productiva se puede incrementar la demanda sobre ese recurso o reducir su cantidad o capacidad. También ayuda el balancear las cargas de trabajo. En un sistema con alta variabilidad en los tiempos de actividad es difícil lograr una alta utilización de los recursos. Los talleres por ejemplo, tienden a tener una baja utilización. Incrementar la utilización en recursos que nos son cuellos de botella, solo crea más inventario sin mejorar el rendimiento
- **Tiempo de valor agregado.** Es el tiempo durante el cual el material o los clientes reciben transformaciones que agregan valor (valor definido como cualquier cosa por la que el cliente esté dispuesto a pagar). Los tiempos de inspección y de espera no se consideran de valor agregado
- **Tiempo de espera.** La cantidad de tiempo en que el material o los clientes esperan a ser procesados. Este valor puede ser menor al disminuir el número de entidades en el sistema. También se reduce al disminuir el número de variación e interdependencias
- **Tasa de flujo.** Es el número de productos o clientes servidos por unidad de tiempo. También se le llama tasa de producción, tasa de procesamiento o tasa de rendimiento. Esta métrica puede ser incrementada al utilizar mejor los recursos, especialmente los cuellos de botella, asegurando que la operación del cuello de botella nunca estará bloqueada o sin insumos. Una vez que el rendimiento del sistema es igual al del cuello de botella se puede lograr una capacidad mayor acelerando la operación, reduciendo los tiempos muertos y de puesta en marcha, adicionando más recursos o descargando trabajo

- **Niveles de inventario o de encolamiento.** Es el número de partes en almacén o clientes en área de espera. Es deseable mantener los niveles de líneas de espera en el mínimo. En donde los niveles de espera varían, a veces es mejor controlar los valores máximo y mínimo, el encolamiento ocurre si los recursos no están disponibles cuando se les necesita. Los niveles de inventario o líneas de espera pueden ser controlados balanceando el flujo o restringiendo la producción en los recursos que no son cuellos de botella. La producción justo a tiempo (JIT) es una forma de controlar los niveles de inventario
- **Rendimiento.** Desde el punto de vista de producción es el porcentaje de productos completados (según las especificaciones), sobre el número total de productos que entraron al sistema como materia prima. Si 95 de 100 productos no tiene defecto, el rendimiento es del 95%. El rendimiento puede ser medido por su complemento, la tasa de rechazo o de desperdicio
- **Capacidad de respuesta al cliente.** La capacidad del sistema para entregar productos a tiempo, minimizando la espera del cliente. Puede ser medido por la **tasa de surtimiento** (fill rate) que es el número de órdenes que pueden ser surtidas inmediatamente con el inventario. El minimizar el retraso de una tarea puede ser necesario para minimizar el tiempo total o el número de pedidos retrasados. En las operaciones que fabrican para inventario (make-to-stock), la respuesta al cliente puede ser asegurada manteniendo los niveles de inventario adecuados. La respuesta en los sistemas que fabrican por orden mejora al disminuir el inventario y ganar un tiempo de ciclo menor
- **Varianza.** El grado de fluctuación que ocurre en cualquiera de las métricas precedentes. La varianza significa incertidumbre y por ende, riesgo en el logro de las metas de desempeño deseadas. Los proveedores de productos y servicios continuamente están interesados en reducir la varianza en la entrega

Estas métricas pueden ser aplicadas al sistema entero o pueden ser divididas por recurso, tipo de entidad u otras características. Al relacionar estas mediciones con otros factores, se pueden derivar indicadores más significativos, útiles para análisis comparativos o gestión global. Las métricas relacionales más comunes son: tiempo de flujo mínimo teórico entre tiempo de flujo real (eficiencia del tiempo de flujo), costo por unidad producida (costo unitario), inventario anual vendido sobre inventario promedio (vueltas de inventario) y unidades producidas por costo o por mano de obra (productividad).

Variables del sistema

Diseñar o mejorar sistemas existentes requiere más que solo identificar los componentes y las metas de desempeño del sistema. Se requiere entender cómo los elementos del sistema se afectan unos a otros y a los objetivos globales de desempeño. Para comprender estas relaciones se deben comprender tres tipos de variables: variables de decisión, variables de respuesta y variables de estado.

Variables de decisión

Las variables de decisión también son llamadas factores de entrada o variables independientes en un experimento. Al cambiar los valores de las variables independientes, se cambia el comportamiento de todo el sistema. Las variables independientes pueden ser controlables o no, dependiendo si el experimentador es capaz de manipularlas. Un ejemplo de una variable controlable es el número de operadores a asignar a una línea de producción, o si trabajan uno o dos turnos.

Las variables controlables son llamadas variables de decisión porque quien toma las decisiones (experimentador) controlan sus valores. Una variable incontrolable puede ser el tiempo en que se le da servicio a un cliente o la tasa de rechazo de una operación. Cuando se define el sistema las variables controlables representan información preescriptiva más que descriptiva. Obviamente todas las variables independientes en un experimento son totalmente controlables, pero a un costo. Lo importante es que unas variables son más fáciles de cambiar que otras. Cuando se conducen experimentos, la solución final generalmente se basa en la razón costo-beneficio de implementar el cambio.

Variables de respuesta

Las variables de respuesta, algunas veces llamadas desempeño o variables de salida, miden el desempeño del sistema en respuesta a la configuración particular de las variables de decisión. Una variable de respuesta podría ser el número de entidades procesadas para un periodo dado, la utilización promedio de un recurso o cualquiera de las otras métricas de desempeño del sistema.

En un experimento, la variable de respuesta es la variable dependiente, la cual depende de la configuración particular de las variables independientes. El experimentador no manipula las variables dependientes, solo las variables de decisión o independientes. Obviamente la meta en planeación de sistemas es encontrar los valores correctos o la configuración de variables de decisión que dan los valores de respuesta deseados.

Variables de estado

Indican las condiciones del sistema en cualquier punto específico del tiempo. Ejemplos de variables de estado son: el número actual de entidades esperando a ser procesadas o el estatus actual (ocupado, disponible o fuera de servicio) de un recurso en particular. Las variables de respuesta son generalmente resúmenes de cambios de las variables estado en el tiempo. Por ejemplo, los tiempos individuales que una máquina está en un estado ocupado pueden ser sumados dentro de un periodo particular y divididos por el tiempo total disponible para reportar la utilización de la máquina en ese periodo. Las variables de estado son variables dependientes como las variables de respuesta. Ambas dependen de la configuración de las variables independientes.

Las variables de estado son comúnmente ignoradas en los experimentos ya que no son directamente controladas como variables de decisión y tampoco son de mucho interés para el comportamiento global reportado por las variables de respuesta.

Tipos de simulación

La forma en que la simulación opera se basa ampliamente en el tipo de simulación del que se trata. Hay muchas formas de categorizar la simulación. Algunas de ellas son:

- Estática o dinámica
- Estocástica o determinística
- De eventos discretos o continuos

Simulación estática contra simulación dinámica

La simulación estática es tal que no se basa en el tiempo. Comúnmente implica reunir muestras aleatorias para generar una salida estadística, por lo que es también llamada simulación Montecarlo. En las finanzas la simulación Montecarlo es usada para seleccionar un portafolio de opciones de inversión. Dado un portafolio, con diferentes rendimientos probabilísticos, es posible generar un rédito esperado. Un proveedor de sistemas de manejo de materiales desarrolló un modelo de simulación estática para calcular el tiempo esperado en los movimientos de anaqueles de un sistema de almacenamiento. Se utilizó una muestra aleatoria de 100 relaciones origen-destino para estimar el tiempo promedio de viaje. Si tratara de un arreglo de 1000 posiciones, se hubieran tenido que realizar 1000! Cálculos.

La simulación dinámica considera el paso del tiempo y registra los cambios de estado ocurridos. Un mecanismo de reloj se mueve hacia adelante en el tiempo y las variables de estado se actualizan a éste ritmo. La simulación dinámica es muy apropiada para analizar sistemas de servicio y manufactura porque estos operan mientras transcurre el tiempo.

Simulación estocástica contra simulación determinística

Las simulaciones en que una o más variables de entrada son aleatorias son llamadas simulaciones estocásticas o probabilísticas. Una simulación estocástica produce salidas aleatorias y por consiguiente dan solamente un punto de datos de cómo el sistema se podría comportar.

Las simulaciones sin componentes de entrada aleatorios son llamadas determinísticas. Los modelos de simulación determinística se construyen en la misma forma que los modelos estocásticos excepto en que estos no contienen aleatoriedad. En una simulación determinística todos los futuros estados se determinan una vez que los datos de entrada y el estado inicial han sido definidos.

Una simulación determinística producirá siempre la misma salida sin importar cuántas veces se ejecute. En una simulación estocástica se deben hacer muchas ejecuciones aleatorias (réplicas) para obtener una estimación precisa del desempeño porque cada ejecución varía estadísticamente. Los estimados de desempeño para simulaciones estocásticas se obtienen calculando el valor promedio de la métrica de desempeño a través de todas las réplicas. En contraste, las simulaciones determinísticas requieren ser ejecutadas una sola vez para obtener resultados precisos.

Dado que la gran mayoría de los sistemas involucran variables estocásticas, es de gran utilidad el estudio de métodos estadísticos realizar simulaciones de dichos sistemas. Estos métodos están fuera del alcance de este capítulo, pero en el apéndice 1 se puede encontrar un resumen de los mismos.

Simulación de eventos discretos contra simulación continua

En la simulación de eventos discretos los cambios de estado ocurren en puntos discretos en el tiempo desencadenados por eventos. Algunos eventos típicos de simulación son:

- El arribo de una entidad a una estación de trabajo
- La falla de un recurso
- La conclusión de una actividad
- El fin de turno

Cuando algún evento sucede, ocurren cambios de estado en el modelo. El estado del modelo se convierte en el estado colectivo de todos los elementos en el modelo en un punto particular del tiempo. Las variables de estado en una simulación de eventos discretos son llamadas variables de estado de cambio discreto (Harrell, 2003). Una simulación de un restaurante es un ejemplo de una simulación de eventos discretos porque todas las variables de estado en el modelo, tales como el número de clientes en el restaurante son variables de estado de cambio discreto (ver figura 1.6).

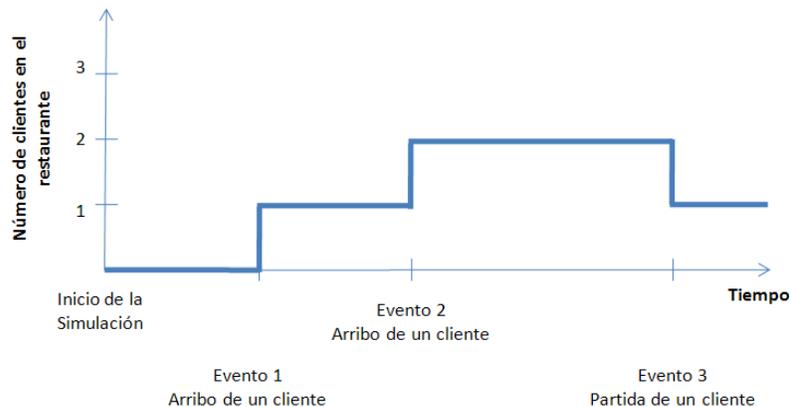


Figura 1.6. Cambios de estado discretos

En la simulación continua, las variables de estado cambian con respecto al tiempo en forma continua y por eso se llaman variables de estado de cambio continuo. Un ejemplo es el nivel de aceite en un tanque que está siendo cargado o descargado, o la temperatura de un edificio controlada por sistemas de calefacción y enfriamiento. La figura 1.7 compara variables de estado de cambio discretas y continuas sobre el tiempo.

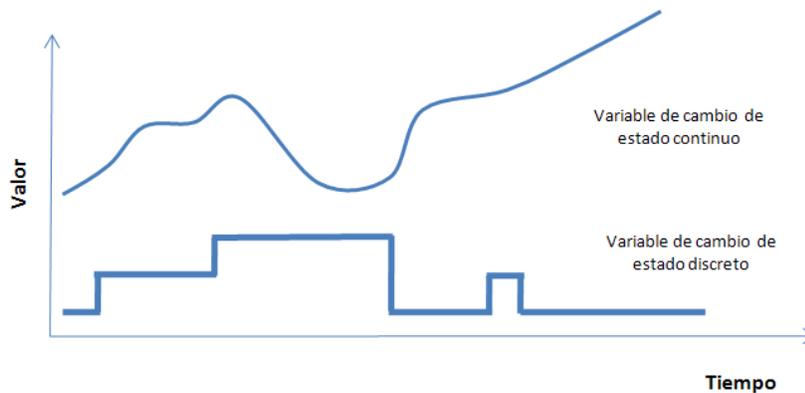


Figura 1.7. Comparación entre variables discretas y continuas

Muchos programas de simulación tienen funcionalidades tanto discretas como continuas, lo que permite modelar características de estos dos tipos y obtener una simulación híbrida. La mayoría de los sistemas tienen ambos tipos de variables. Las interacciones entre variables discretas y continuas se dan en cuatro categorías básicas:

- El valor de una variable continua puede incrementarse o decrementarse repentinamente como resultado de un evento discreto (por ejemplo el resurtido de un inventario)
- Un evento discreto se desencadena como resultado de que una variable continua alcance un cierto nivel (por ejemplo alcanzar el punto de reorden)
- La tasa de cambio de una variable continua se ve alterada como resultado de un evento discreto (por ejemplo la tasa de uso de inventario se ve alterada por un cambio repentino en la demanda)
- Inicio o paro del cambio en una variable continua como resultado de un evento discreto. (por ejemplo si el resurtido o terminación de un inventario inicia o termina el cambio en una variable)

Cuando se describe un sistema es natural hacerlo en términos del flujo de proceso. Las entidades se comienzan a procesar en la actividad a, después son movidas a la b y así consecutivamente. Los eventos en simulación son de dos tipos: planeados y condicionales. Ambos generan retrasos en las actividades para simular el paso del tiempo. Un evento planeado es aquel cuya ocurrencia puede ser determinada con anterioridad. Un evento condicional es desencadenado cuando se alcanza una condición independientemente del tiempo en que ocurre.

En los sistemas físicos los eventos ocurren simultáneamente. En una simulación por computadora, especialmente cuando se usa un solo procesador, solo se atiende un evento a la vez, aunque se considere que es un mismo instante en tiempo de simulación. Como consecuencia se debe establecer un método o regla para eventos que ocurran en el mismo instante de tiempo simulado. En algunos casos el orden en que los eventos simultáneos (en tiempo de simulación) son procesados puede ser significativo. La figura 1.8 representa el ciclo de procesamiento de la simulación de eventos discretos y el uso del reloj de tiempo de simulación.

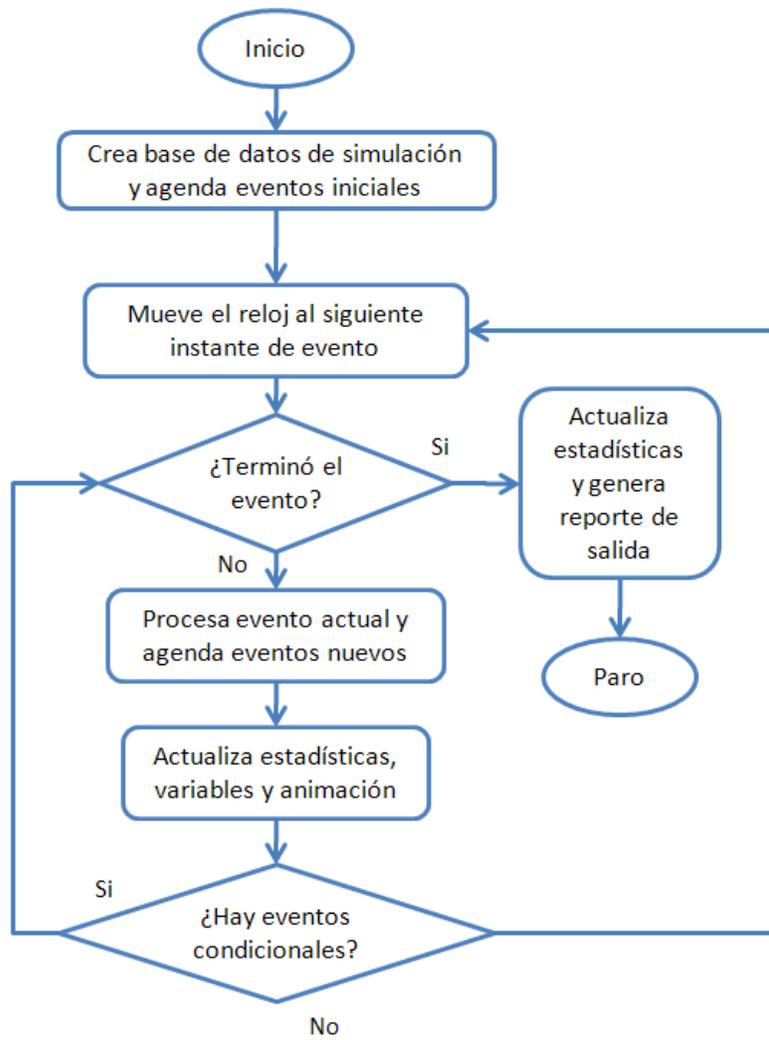


Figura 1.8. Diagrama lógico de cómo funciona la simulación de eventos discretos

Capítulo 2. Técnicas de programación

Introducción

La programación de las operaciones es una actividad que se realiza como consecuencia del alineamiento con la planeación de la cadena de suministro. En este capítulo veremos la descripción del proceso de planeación desde lo más general (plan agregado de ventas y operaciones) hasta lo más particular (programación de operaciones).

La planeación de ventas y operaciones es un proceso que ayuda a ofrecer un mejor servicio al cliente, manejar un inventario más bajo, ofrecer al cliente tiempos de entrega más breves, estabilizar los índices de producción y facilitar a la gerencia el manejo del negocio. El proceso se basa en el trabajo de equipo entre los departamentos de ventas, operaciones, finanzas y desarrollo de productos. El proceso está diseñado para ayudar a una compañía a equilibrar la oferta y la demanda, y mantenerlas así a través del tiempo. Este equilibrio es esencial para el buen manejo de un negocio (Chase, 2009).

El proceso de planeación de ventas y operaciones consiste en una serie de juntas, que culminan en una junta a alto nivel donde se toman las decisiones clave a mediano plazo. La meta final es un acuerdo entre los distintos departamentos sobre el mejor curso de acción para lograr un equilibrio óptimo entre la oferta y la demanda. La idea es alinear el plan de operaciones con el plan de negocios.

Este equilibrio debe ocurrir tanto en un nivel agregado como en el nivel de cada producto. Con el tiempo, es necesario garantizar que se tiene una capacidad total suficiente. Como, a menudo la demanda es muy dinámica, es importante vigilar las necesidades esperadas en 3 a 18 meses, o posteriormente. Al planear con tanta anticipación, es difícil saber con precisión la cantidad de un producto en particular que se va a necesitar, pero es necesario saber cómo se venderá un grupo más numeroso de productos similares. Si se cuenta con la capacidad suficiente, los programadores de productos individuales trabajando dentro de las limitaciones de la capacidad conjunta, pueden manejar el lanzamiento diario y semanal de pedidos de productos individuales para cubrir la demanda a corto plazo.

La figura 2.1 posiciona la planeación de ventas y operaciones en relación con otras actividades de planeación importantes (Chase, 2009). El término **planeación de ventas y operaciones** se creó en las empresas para hacer referencia al proceso que ayuda a las compañías a mantener un equilibrio entre la oferta y la demanda. En la gerencia de operaciones y suministro, este proceso se conoce como *planeación agregada*.

En la planeación de ventas y operaciones, mercadotecnia desarrolla un plan de ventas que comprende los siguientes 3 a 18 meses. Este plan de ventas casi siempre se expresa en unidades del conjunto de grupos de productos y está asociado con los programas de incentivos de ventas y otras actividades de mercadotecnia. El área de operaciones elabora un plan de operaciones como resultado del proceso, mismo que se estudiará a fondo en este capítulo. Al concentrarse en los volúmenes agregados de ventas y productos, las funciones de mercadotecnia y operaciones pueden desarrollar planes sobre la forma en

que se cubrirá la demanda. Ésta es una tarea muy complicada cuando existen cambios en la demanda a través del tiempo debidos a las tendencias en el mercado, la estacionalidad u otros factores.

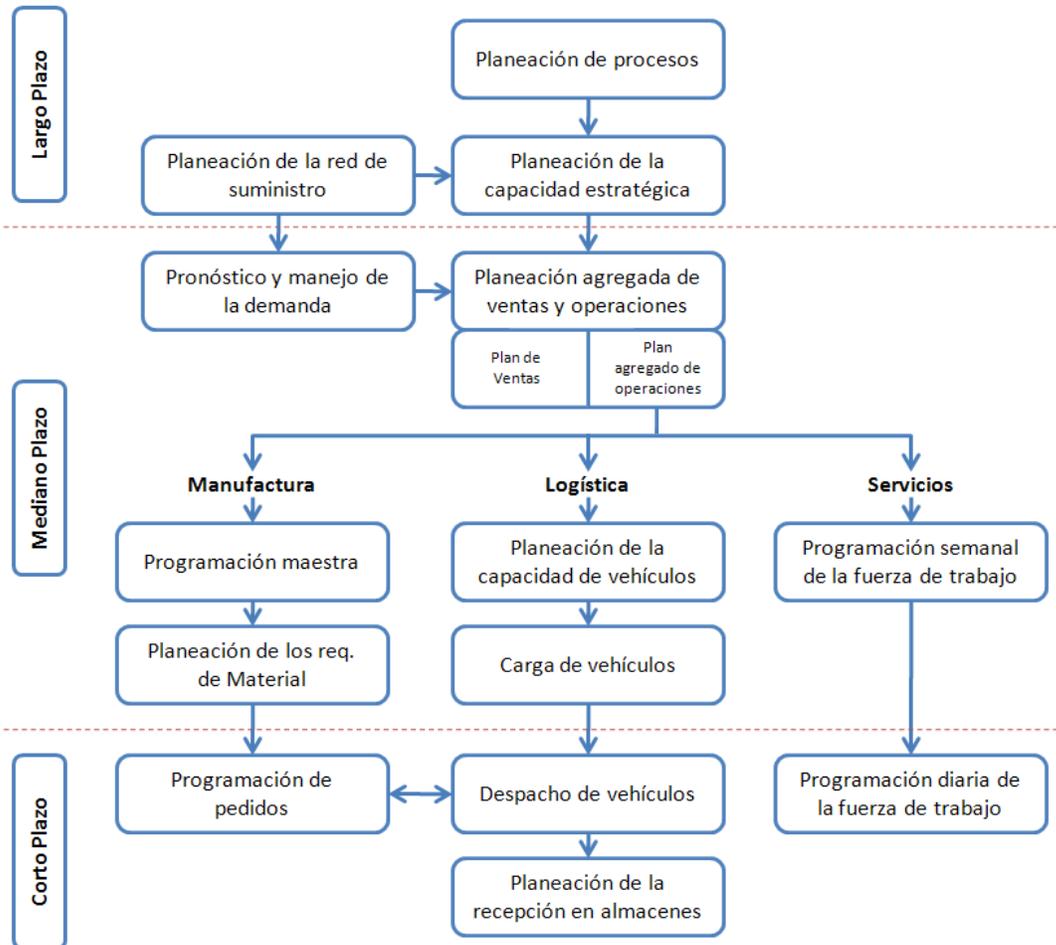


Figura 2.1. Esquema de las principales operaciones y actividades

En cuanto a la oferta, las operaciones agregadas se llevan a cabo por familias de productos y, en relación con la demanda, por grupos de clientes. Los programas de fabricación de cada producto y los pedidos de los clientes correspondientes se pueden manejar con mayor facilidad como resultado del proceso de planeación de ventas y operaciones. Por lo regular, la planeación de ventas y operaciones ocurre en un ciclo mensual. Esta planeación une los planes estratégicos y el plan de negocios de una empresa con sus procesos de operaciones y suministro detallados. Estos procesos detallados incluyen manufactura, logística y actividades de servicio, como se muestra en la figura 2.1 (Chase, 2009). En esta figura, la dimensión del tiempo aparece como plazos largos, medianos y cortos. Por lo general, la planeación a largo plazo se lleva a cabo anualmente, enfocándose en un horizonte de más de un año. La planeación de mediano plazo casi siempre cubre un período de 3 a 18 meses con incrementos de tiempo semanal,

mensual o trimestral. La planeación a corto plazo cubre un período que va desde un día a 6 meses con incrementos diarios o semanales. Las actividades de planeación a largo plazo se realizan en dos áreas principales. La primera es el diseño de los procesos de manufactura y servicios. La segunda es el diseño de las actividades de logística. La planeación de procesos se ocupa de determinar las tecnologías y procedimientos específicos requeridos para producir un bien o servicio. La planeación de la capacidad estratégica se encarga de determinar las capacidades a largo plazo de los sistemas de producción. De manera similar desde el punto de vista de la logística, la planeación de la red de suministro determina cómo se va a realizar la distribución.

Las actividades de mediano plazo incluyen el pronóstico y manejo de la demanda, así como la planeación de ventas y operaciones. A partir de los datos del pronóstico, se llevan a cabo los planes de ventas y operaciones detallados para cubrir la demanda. Los planes de venta proporcionan información para las actividades de la fuerza de ventas y mercadotecnia. El plan de operaciones da información a las actividades de manufactura, logística y planeación de servicios. La programación maestra y la planeación de los requerimientos de materiales están diseñadas para generar programas detallados que indican el momento en que se necesitan las piezas para las actividades de manufactura. Los planes de logística y los productos terminados por toda la cadena de suministro se coordinan con los planes anteriores. Los detalles a corto plazo se enfocan sobre todo en la programación de la producción y las órdenes de embarque de la empresa.

2.1 Plan agregado de operaciones

El plan agregado de operaciones se ocupa de establecer los índices de producción por grupo de productos u otras categorías a mediano plazo (Chase, 2009). El plan agregado procede del programa maestro. El propósito principal del plan agregado es especificar la combinación óptima de índice de producción, nivel de la fuerza de trabajo e inventario a la mano. El índice de producción se refiere al número de unidades terminadas por unidad de tiempo. El nivel de la fuerza de trabajo es el número de trabajadores necesario para la producción ($\text{producción} = \text{índice de producción} * \text{nivel de la fuerza de trabajo}$). El inventario a la mano es el inventario no utilizado que quedó del período anterior.

Este es el planteamiento formal del problema de la planeación conjunta: dado el pronóstico de la demanda f_t para cada período t en el horizonte de planeación que abarca t períodos, determine el nivel de producción p_t , el nivel de inventario i_t , y el nivel de fuerza de trabajo w_t , para los períodos $t=1,2,3,\dots,t$, que minimicen los costos relevantes en el horizonte de planeación.

La forma del plan agregado varía en cada compañía. En algunas empresas se trata de un reporte formal que contiene los objetivos y las premisas de planeación en que se basa. En otras compañías, sobre todo en las pequeñas, el propietario puede realizar cálculos sencillos de las necesidades de fuerza de trabajo que reflejen una estrategia de personal general.

El proceso del que se deriva el plan en sí también varía. Un enfoque común es derivarlo del plan corporativo anual como muestra la figura 2.1. Un plan corporativo típico contiene una sección sobre manufactura que especifica cuántas unidades en cada línea de productos es necesario producir durante los próximos 12 meses para cumplir con el pronóstico de ventas. El responsable del plan toma esta

información y determina cómo cubrir mejor estos requerimientos en unidades equivalentes y utiliza esto como la base del plan conjunto. Por ejemplo, quizá una división de General Motors tenga que producir un número determinado de autos de todo tipo en una planta en particular. El responsable del plan de producción tomaría el promedio de horas de trabajo requeridas para todos los modelos como la base del plan agregado. Las mejoras a este plan, en específico a los tipos de modelos, se reflejarán en los planes de producción a más corto plazo.

Otro enfoque consiste en desarrollar el plan agregado para simular diversos programas de producción maestros y calcular los requerimientos de capacidad correspondientes con el fin de saber si existen la fuerza de trabajo y el equipo adecuados en cada centro de trabajo. Si la capacidad es inadecuada se especifican los requerimientos adicionales de tiempo extra, subcontratación, trabajadores adicionales, etc. Para cada línea de producción y se combinan en un plan grosso modo. Después este plan se modifica con métodos de pruebas o matemáticos para derivar en un plan final a menor costo.

En esencia hay tres estrategias de planeación de la producción, que corresponden a cambios en el tamaño de la fuerza de trabajo, las horas de trabajo, el inventario y la acumulación de pedidos.

1. **Estrategia de ajuste.** Igualar el índice de producción con el índice de pedidos contratados y despedir empleados conforme varía el índice de pedidos. El éxito de esta estrategia es tener un grupo de candidatos a los que se pueda capacitar con rapidez y de donde tomar empleados cuando aumente el volumen de pedidos. Como es obvio existen algunos impactos emocionales. Cuando la acumulación de pedidos es baja es probable que los empleados quieran reducir el ritmo de trabajo por el temor a ser despedidos tan pronto como se cubran los pedidos existentes.
2. **Fuerza de trabajo estable, horas de trabajo variables.** Variar la producción ajustando el número de horas trabajadas por medio de horarios de trabajo flexibles u horas extras. Al variar el número de horas es posible igualar las cantidades de producción con los pedidos. Esta estrategia ofrece continuidad a la fuerza de trabajo y evita muchos de los costos emocionales y tangibles de la contratación y despidos de la estrategia de ajuste.
3. **Estrategia de nivel.** Mantener una fuerza de trabajo estable con un índice de producción constante. La escasez y el superávit se absorben mediante la fluctuación de los niveles de inventario, los pedidos acumulados y las ventas perdidas. Los empleados se benefician con un horario de trabajo estable a expensas de los niveles de servicio a clientes potencialmente más bajos y un aumento en el costo del inventario. Otra preocupación es que los productos inventariados se vuelvan obsoletos.

Cuando solo se utiliza una de estas variables para absorber las fluctuaciones de la demanda, se conoce como estrategia pura. Dos o más estrategias utilizadas en combinación constituyen una estrategia mixta. Como se puede imaginar, las estrategias mixtas se aplican con mayor frecuencia en la industria.

Además de estas estrategias, se puede subcontratar parte de la producción. Esta estrategia es similar a la de ajuste. Cierta nivel de subcontratación es necesario para ajustarse a las fluctuaciones de la demanda. Sin embargo, a menos que la relación con el proveedor sea muy fuerte, un fabricante puede perder

cierto control sobre la programación y la calidad. Por esta razón una subcontratación excesiva se considera una estrategia de alto riesgo.

2.2 Programa maestro de producción

El siguiente nivel del proceso de planeación es el programa maestro de producción. Este programa es el plan con todos los tiempos desglosados que especifica cuántas piezas finales va a fabricar la empresa y cuando (Chase, 2009). Por ejemplo el plan agregado de una compañía de muebles especificaría el volumen total de colchones que va a producir el siguiente mes o trimestre. El programa maestro da el siguiente paso e identifica el tamaño exacto de los colchones, su calidad y estilo. El programa maestro también asienta período a período (generalmente semanal) cuántos colchones de estos tipos se necesitan y cuándo.

El aspecto de planeación de requerimientos de materiales de las actividades de manufactura guarda una relación estrecha con el programa maestro, la lista de materiales y los informes de producción, según se aprecia en la figura 2.2.

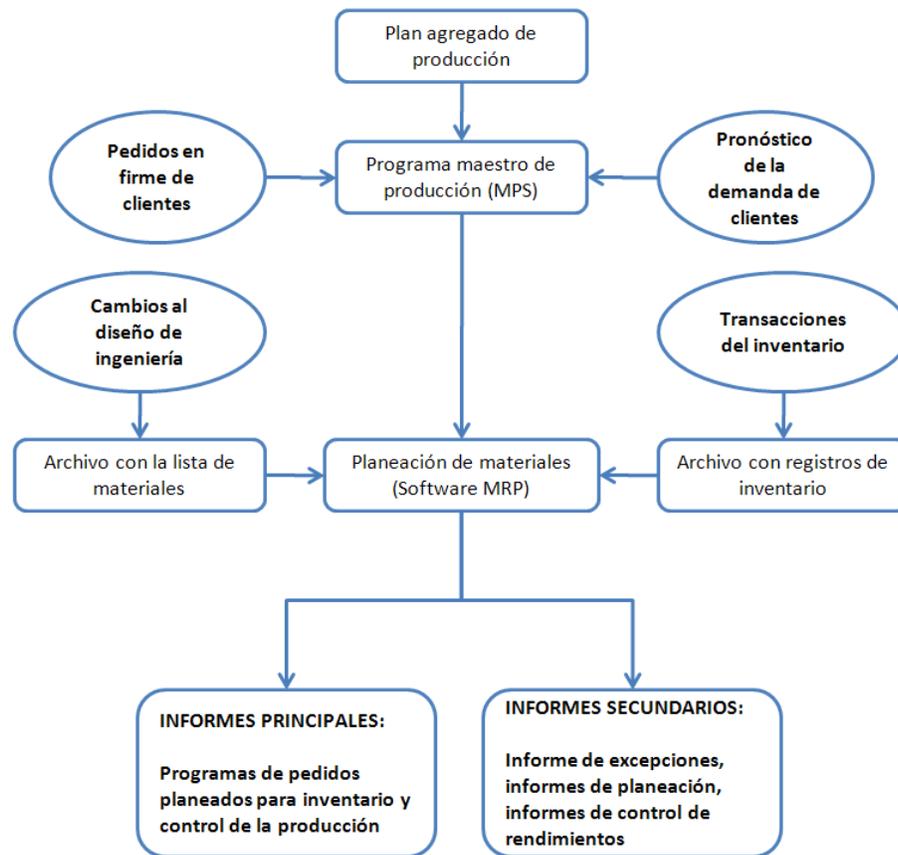


Figura 2.2. Vista de los elementos que componen un programa general de planeación de necesidades y los informes que lo componen

La demanda de productos terminados viene principalmente de dos fuentes: los clientes que hacen pedidos y la demanda pronosticada.

El archivo con la lista de materiales (BOM) contiene la descripción completa de los productos y anota materiales, piezas y componentes, además de la secuencia en que se elaboran los productos. El archivo con la lista de materiales se llama también "archivo de estructura del producto" o "árbol del producto" porque muestra todos los niveles en que se arma un producto.

Los registros de inventario contienen para cada pieza un segmento maestro de datos de pieza (numero de pieza, descripción, tiempo de espera, costo estándar, volumen del pedido, ciclo, etc.), un segmento de estado del inventario (asignado, saldo de control, período, necesidades brutas, entradas programadas, etc.), y un segmento de datos filiales (detalles pedidos, medidas pendientes, contadores, etc.).

En esencia, el sistema MRP funciona como sigue: el programa maestro de producción señala el número de piezas que se van a producir en tiempos específicos. En un archivo con la lista de materiales se especifican los materiales que se usan para hacer cada pieza y las cantidades correctas de cada uno. El archivo con el registro de inventarios contiene datos como el número de unidades disponibles y pedidas. Estas tres fuentes de datos se combinan en el programa de requerimiento de materiales que despliega el programa de producción en un detallado plan de programación de pedidos para toda la secuencia de la producción.

2.3 Secuenciación de los trabajos

El proceso de determinar el pedido en una máquina o en un centro de trabajo se llama **secuenciación** o también secuenciación por prioridades. Las **reglas de prioridad** son reglas usadas para obtener una secuenciación de los trabajos. Las reglas pueden ser muy simples y pedir únicamente que los trabajos se ordenen de acuerdo con un dato, como el tiempo de procesamiento, plazo u orden de llegada. Otras reglas, aunque también simples, requieren más datos, casi siempre para obtener un número indicador, como la regla del menor margen de tiempo y la regla de la proporción crítica (Chase, 2009).

REGLA	DESCRIPCIÓN
1. FCFS	<i>First-come, first-served.</i> (primero en entrar, primero en trabajarse). Los pedidos se ejecutan en el orden en que llegan al departamento.
2. SOT	<i>Shortest operating time.</i> (tiempo de operación más breve). Ejecutar primero el trabajo con el tiempo de terminación más breve, luego el siguiente más breve, etc. Se llama también SPT (<i>shortest processing time</i> , tiempo de procesamiento más breve). A veces la regla se combina con una regla de retardo para evitar que los trabajos con tiempos más demorados se atrasen demasiado.
3. EDD	<i>Earliest due date first.</i> (primero el plazo más próximo) Se ejecuta primero el trabajo que antes se venza.
4. STR	<i>Slack time remaining.</i> (tiempo ocioso restante). Se calcula como el tiempo que queda antes de que se venza el plazo menos el tiempo restante de procesamiento. Los pedidos con menor tiempo ocioso restante (STR) se ejecutan primero. STR= Tiempo restante antes de la fecha de vencimiento – tiempo de procesamiento restante
5. STR/OP	<i>Slack time remaining per operation.</i> (tiempo ocioso restante por operación). Se ejecutan primero los pedidos con el menor tiempo ocioso por números de operaciones. STR/OP = STR/Número de operaciones restantes
6. CR	<i>Critical rate.</i> (<i>proporción crítica</i>). Se calcula como la diferencia entre la fecha de vencimiento y la fecha actual, dividida entre el número de días hábiles que quedan. Se ejecutan primero los pedidos con la menor CR.
7. LCFS	<i>Last-come, first-served.</i> (último en llegar, primero en trabajarse). Esta regla se aplica a menudo automáticamente. Cuando llegan los pedidos, de ordinario se colocan arriba de la pila; el operador toma primero el que esté más alto.
8. ALEATORIO	Orden aleatorio o capricho. Los supervisores u operadores escogen el trabajo que quieran ejecutar.

Figura 2.4. Reglas de prioridad para ordenar trabajos

Otras reglas, como la de Johnson, se aplican a la programación de trabajos en una secuencia de máquinas y requieren un procedimiento de cómputo para especificar el orden de desempeño. En la figura 2.4 se anotan ocho reglas comunes de prioridad.

Las siguientes medidas de desempeño de los programas se usan para evaluar las reglas de prioridad:

1. Cumplir las fechas de los clientes o de las operaciones posteriores
2. Minimizar el tiempo de tránsito (el tiempo que pasa un trabajo en el proceso)
3. Minimizar el inventario de trabajos sin terminar
4. Minimizar el tiempo ocioso de máquinas y trabajadores

Programación de n trabajos en una máquina

A continuación se comparan las ocho reglas de prioridad en una situación estática de programación que abarca cuatro trabajos en una máquina. La dificultad teórica de los problemas de programación aumenta conforme se consideran más máquinas, más que cuando se procesan más trabajos.

Ejemplo 2.1 (Chase, 2009).

Copy-express, proporciona servicios de fotocopiado a empresas legales del centro de los ángeles. Cinco clientes entregaron sus pedidos al comienzo de la semana. Los datos concretos de programación son los siguientes:

TRABAJO (ORDEN DE LLEGADA)	TIEMPO DE PROCESAMIENTO (DIAS)	PLAZO (DÍAS FALTANTES)
A	3	5
B	4	6
C	2	7
D	6	9
E	1	2

Todos los pedidos tienen que hacerse en la única fotocopiadora a color. Se tiene que decidir la secuencia de procesamiento de los cinco pedidos. El criterio de evaluación es el tránsito mínimo.

Solución 1. Regla FCFS. First come first served.

Ejecutando los pedidos en el orden que llegan se tiene:

TRABAJO	TIEMPO DE PROCESAMIENTO	PLAZO	TIEMPO DE TRÁNSITO
A	3	5	0+3=3
B	4	6	3+4=7
C	2	7	7+2=9
D	6	9	9+6=15
E	1	2	16+1=16

Acumulando los tiempos de tránsito de cada trabajo se obtiene que el tiempo total de tránsito es $3+7+9+15+16=50$ días. Y el tiempo de tránsito promedio es de $50/5 = 10$ días. Si se compara el tiempo de tránsito de cada trabajo con su plazo, se puede ver que sólo el trabajo A estará listo a tiempo. Los trabajos B, C, D y E se demorarán 1, 2, 6 y 14 días respectivamente. En promedio un trabajo se demorará $(0+1+2+6+14)/5 = 4.6$ días.

Solución 2. Regla SOT. Shortest operating time

Dando mayor prioridad al trabajo con el menor tiempo de procesamiento se tiene:

TRABAJO	TIEMPO DE PROCESAMIENTO	PLAZO	TIEMPO DE TRÁNSITO
E	1	2	0+1=1
C	2	7	1+2=3
A	3	5	3+3=6
B	4	6	6+4=10
D	6	9	10+6=16

Acumulando los tiempos de tránsito de cada trabajo se tiene que el tiempo total de tránsito es $1+3+6+10+16=36$ días. Y el tiempo de tránsito promedio es de $36/5 = 7.2$ días. Si se compara el tiempo de tránsito de cada trabajo con su plazo, se puede ver que los trabajos e y c estarán listos a tiempo. Los trabajos a, b, y d se demorarán 1, 4 y 7 días respectivamente. En promedio un trabajo se demorará $(0+0+1+4+7)/5 = 2.4$ días.

Solución 3. Regla EDD. Earliest due date

Dando mayor prioridad al trabajo con el menor plazo de vencimiento se tiene:

TRABAJO	TIEMPO DE PROCESAMIENTO	PLAZO	TIEMPO DE TRÁNSITO
E	1	2	0+1=1
A	3	5	1+3=4
B	4	6	4+4=8
C	2	7	8+2=10
D	6	9	10+6=16

Acumulando los tiempos de tránsito de cada trabajo se ve que el tiempo total de tránsito es $1+4+8+10+16=39$ días. Y el tiempo de tránsito promedio es de $39/5 = 7.8$ días. Si se compara el tiempo de tránsito de cada trabajo con su plazo, se puede ver que los trabajos e y a estarán listos a tiempo. Los trabajos b, c y d se demorarán 2, 3 y 7 días respectivamente. En promedio un trabajo se demorará $(0+0+2+3+7)/5 = 2.4$ días.

Solución 4. Regla STR. Slack time remaining

Calculando el margen de tiempo y dando prioridad a este criterio se tiene:

TRABAJO	TIEMPO DE PROCESAMIENTO	PLAZO	MARGEN DE TIEMPO	TIEMPO DE TRÁNSITO
E	1	2	1	0+1=1
A	3	5	2	1+3=4
B	4	6	2	4+4=8
D	6	9	3	8+6=14
C	2	7	5	14+2=16

Acumulando los tiempos de tránsito de cada trabajo se observa que el tiempo total de tránsito es $1+4+8+14+16=43$ días. Y el tiempo de tránsito promedio es de $43/5 = 8.6$ días. Si se compara el tiempo de tránsito de cada trabajo con su plazo, se puede ver que los trabajos e y a estarán listos a tiempo. Los trabajos b, c y d se demorarán 2, 5 y 9 días respectivamente. En promedio un trabajo se demorará $(0+0+2+5+9)/5 = 3.2$ días.

Solución 5. Regla STR / OP. Slack time remaining per operation

En este ejemplo la regla STR / OP no aplica debido a que se trata de una sola operación.

Solución 6. Regla CR. Critical rate

Calculando la tasa crítica, esta regla es equivalente a la regla EDD.

Solución 7. Regla LCFS. Last come first served

Dando prioridad al trabajo con llegada más reciente se tiene:

TRABAJO	TIEMPO DE PROCESAMIENTO	PLAZO	TIEMPO DE TRÁNSITO
E	1	2	0+1=1
D	6	9	1+6=7
C	2	7	7+2=9
B	4	6	9+4=13
A	3	5	13+3=16

Acumulando los tiempos de tránsito de cada trabajo se obtiene que el tiempo total de tránsito es $1+7+9+13+16=46$ días. Y el tiempo de tránsito promedio es de $46/5 = 9.2$ días. Si se compara el tiempo de tránsito de cada trabajo con su plazo, se puede ver que los trabajos e y d estarán listos a tiempo. Los trabajos c, b y a se demorarán 2, 7 y 11 días respectivamente. En promedio un trabajo se demorará $(0+0+2+7+11)/5 = 4$ días.

Solución 8. Regla de orden aleatorio

Asignando un orden aleatorio se tiene:

TRABAJO	TIEMPO DE PROCESAMIENTO	PLAZO	TIEMPO DE TRÁNSITO
D	6	9	0+6=6
C	2	7	6+2=8
A	3	5	8+3=11
E	1	2	11+1=12
B	4	6	12+4=16

Acumulando los tiempos de tránsito de cada trabajo se ve que el tiempo total de tránsito es $6+8+11+12+16=53$ días. Y el tiempo de tránsito promedio es de $53/5 = 10.6$ días. Si se compara el tiempo de tránsito de cada trabajo con su plazo, se puede ver que el trabajo d estará listo a tiempo. Los trabajos c, a, e y b se demorarán 6, 10 y 10 días respectivamente. En promedio un trabajo se demorará $(0+1+6+10+10)/5 = 5.4$ días.

Comparación de las reglas de prioridad

A continuación se colocan los resultados sintetizados de las reglas.

REGLA	TIEMPO DE TRÁNSITO TOTAL (DIAS)	TIEMPO PROMEDIO DE TRÁNSITO (DIAS)	RETARDO PROMEDIO
FCFS	50.00	10.00	4.60
SOT	36.00	7.20	2.40
EDD	39.00	7.80	2.40
LCFS	46.00	9.20	4.00
ALEATORIO	53.00	10.60	5.40
STR	43.00	8.60	3.20

En este ejemplo SOT es la mejor regla en cuanto a tiempo promedio de tránsito. Además puede demostrarse que la regla SOT genera una solución óptima en el caso de n trabajos en una máquina para el tiempo promedio de espera y también para el retraso promedio. El principal inconveniente es que nunca se empiecen los trabajos grandes si siguen llegando trabajos pequeños. Para evitarlo las compañías recurren a lo que se llama regla SOT truncada, en la que los trabajos que esperan cierto tiempo especificado pasan automáticamente al primer lugar de la cola.

Metodología

Capítulo 3. Simulación en manufactura

Introducción

En este capítulo se presentarán los usos típicos de la simulación de eventos discretos aplicada a procesos de manufactura. Ejemplo de ello son el balanceo de líneas y el control de inventarios, que obedecen a paradigmas de modelado bastante estudiados (Harrell, 2003).

La mayoría de los sistemas de manufactura son sistemas de procesamiento en los cuales la materia prima se transforma en producto terminado a través de una serie de operaciones ejecutadas en estaciones de trabajo. Muchas decisiones de mejora son ejecutadas a prueba y error o según el ánimo del administrador sin conocimiento del impacto que ocasionara esta decisión. Por ejemplo, la reducción del inventario en proceso (WIP) requerido por la disciplina “justo a tiempo” generalmente interrumpe las operaciones debido a la variabilidad, tiempos de puesta en marcha y problemas como estos. Para predecir certeramente el esfuerzo de disminuir los niveles de WIP pueden ser muy útiles las técnicas de simulación.

Otra técnica popular de gestión es la teoría de restricciones, en este enfoque una restricción o cuello de botella se identifica y se implementa una solución arbitraria que busca eliminar esta restricción o al menos mitigar sus efectos. La solución implementada es evaluada y si el impacto no es el deseado se implementa otra solución. Frecuentemente se expresa que la gestión basada en restricciones no puede cuantificar la inversión o generar un plan de acción de solución. Se trata de una técnica de prueba y error en donde una solución probable se implementa con la esperanza de mejora y que esto justifique los costos de la solución. Incluso el ciclo PDCA (plan-do-check-act) de Deming para mejora de procesos implícitamente prescribe una revisión antes de la implementación. De lo que el ciclo PDCA carece es un paso de prueba o simulación del plan antes de la implementación.

3.1 Características de los sistemas de manufactura

Los sistemas de manufactura representan una clase de sistemas de procesamiento en la cual las entidades (materia prima, componentes, subensambles, etc.) se mueven a través de una serie de estaciones de trabajo, filas y áreas de almacenamiento (Harrell, 2003). En oposición a los sistemas de servicio donde las entidades usualmente son humanos, las entidades en sistemas de manufactura son objetos inanimados que tienen arribos y direccionamientos más controlados. La producción de entidades generalmente se efectúa de acuerdo a planes de producción para cubrir cuotas predefinidas. En algunas

formas de producción la operación es desencadenada por una baja en el inventario de bienes terminados (producción make-to-stock) o por órdenes de clientes (make-to-order). Los sistemas de manufactura utilizan diversos grados de mecanización y automatización para el procesamiento de entidades y movimiento de materiales, donde en las instalaciones altamente automatizadas hay muy poca o nula intervención humana. Estas características tienen las siguientes implicaciones en el modelado de sistemas de manufactura:

- Los tiempos de operación tienen poca o nula variabilidad
- Los arribos de las entidades frecuentemente ocurren sincrónicamente
- Las rutas y las secuencias son fijas desde el inicio
- Las entidades se procesan generalmente en lotes
- La confiabilidad en el equipo frecuentemente es un factor clave
- El manejo de materiales puede impactar significativamente el flujo de entidades
- El interés está enfocado usualmente en un comportamiento de estado estable del sistema

Terminología de manufactura

Para ser modelados los sistemas de manufactura requieren el conocimiento de cierta terminología de la industria. Aquí se presentan algunos de los términos más útiles en estos sistemas:

Operación. Una operación es la actividad desempeñada sobre un producto en una estación de trabajo. La operación generalmente se ejecuta para producir algún cambio físico en una parte. Las operaciones de ensamble se efectúan para combinar partes. También pueden efectuarse operaciones que no implican transformación como inspecciones y pruebas.

Estación de trabajo. Una estación o centro de trabajo es el lugar donde una operación es efectuada y consiste en una o más máquinas y/o personas.

Maquina NC. Una máquina NC (control numérico) es una herramienta cuya acción es controlada por una computadora.

Centro de maquinado. Un centro de maquinado esencialmente es una máquina de control numérico con un intercambiador de herramienta que provee más capacidad que una máquina de control numérico aislada. Los centros de maquinado se definen como herramientas multifuncionales controladas numéricamente con intercambiadores de herramienta automáticos y herramientas de cortado rotatorios que permiten la producción automática y programada de diferentes partes.

Plan maestro de producción. El plan maestro define que productos terminados deben fabricarse en un período de tiempo dado.

Plan de producción. El plan de producción es una agenda detallada de la producción para cada componente individual que al final integrará el producto terminado.

Cuello de botella. Tradicionalmente se define como la estación de trabajo que tiene la más alta utilización o la tasa más alta de tiempo de proceso. En un sentido más amplio el cuello de botella puede ser cualquier factor restrictivo en la producción de bienes.

Puesta a punto (setup). Es la actividad requerida para que una estación de trabajo comience a producir un tipo de pieza en particular.

Trabajo (job). Dependiendo de la industria un trabajo se refiere a la actividad o tarea que está siendo ejecutada. En la producción en masa un trabajo se refiere a cada parte individual. En un taller el trabajo se refiere a la orden del cliente que va a ser producida.

Ciclo de tiempo de máquina. Es el tiempo requerido para efectuar una operación unitaria. Si se incluyen los tiempos de carga y descarga a veces se llama tiempo piso a piso.

Capacidad. La capacidad se refiere en el caso de tanques o almacenamientos al número de entidades que puede contener; en el caso de la maquinaria se refiere a la capacidad de producción. La capacidad de producción usualmente se expresa en alguna de las siguientes formas.

- Capacidad teórica. Es la tasa a la que una máquina produciría en condiciones de total eficiencia y producción constante
- Capacidad efectiva. Es la capacidad real de una máquina considerando cargas y descargas y operaciones auxiliares
- Capacidad esperada. Es la capacidad de una máquina considerando el flujo de material en la planta y desabastos y bloqueos
- Capacidad real. Es lo que la máquina produce efectivamente

Tasa de desperdicio (scrap). Es el porcentaje de partes defectuosas que se sacan de producción después de la operación. Su opuesto es la tasa de rendimiento.

Confiabilidad. (reliability). La confiabilidad generalmente se mide en términos del tiempo promedio entre fallas (MTBF), que es la media en que una máquina o pieza del equipo es puesta en marcha después de que falla.

Mantenibilidad. Se mide generalmente en términos de tiempo medio de reparación (MTTR) y es el tiempo promedio requerido para reparar una máquina o pieza del equipo cuando falla.

Disponibilidad. Es el porcentaje del tiempo total planeado en que un recurso está disponible para producción.

Mantenimiento preventivo o planeado. Es el mantenimiento periódico (lubricación, limpieza, etc.) que se le hace a un equipo para mantenerlo en condiciones de producción.

Unidad de carga. Es un grupo de partes consolidado para un contenedor o tarima que va a ser movido dentro del sistema. La idea de una unidad de carga es minimizar el manejo a través de una consolidación estandarizada según la tarima, el contenedor o el dispositivo de desplazamiento.

3.2 Uso de la simulación en manufactura

La simulación ha probado ser muy efectiva al tratar los problemas complejos alrededor de las decisiones de manufactura. Dado que las compañías realizan integraciones verticales y horizontales cada vez con más frecuencia, con el objetivo de mejorar la cadena de valor completa, la simulación es una herramienta esencial para la planeación efectiva de los procesos de producción y entrega.

La simulación en manufactura cubre el rango de aplicaciones desde control de celdas en tiempo real hasta evaluación de tecnología a largo plazo; evaluando la tecnología antes de hacer una inversión. La figura 3.1 muestra el amplio rango del horizonte de planeación (Harrell, 2003).

Administración de celdas	Secuencia de tareas	Carga en recursos	Planeación de la producción	Estudios de cambio de proceso	Configuración del sistema	Evaluación de tecnologías
Segundos	Horas	Días	Semanas	Meses	1-2 Años	2-5 Años

Figura 3.1 rango de decisiones en simulación de sistemas de manufactura

La simulación que se usa para tomar decisiones a corto plazo usualmente requiere modelos más detallados, más parecidos a las operaciones reales, que los modelos usados en la toma de decisiones a largo plazo. A veces el modelo es una réplica exacta del sistema real e incluso detalla el estado actual del sistema, por ejemplo en las aplicaciones de control en tiempo real y en los sistemas de planeación detallada de la producción. En la simulación usada para la toma de decisiones a largo plazo, los modelos pueden o no tener parecido con las operaciones actuales. El modelo no es muy detallado porque las decisiones de alto nivel sobre el futuro se toman con datos difusos e inciertos (Harrell, 2003).

La simulación ayuda a evaluar el desempeño de diseños o la efectividad de políticas alternativas. A continuación se muestra una lista con las preguntas típicas que la simulación de sistemas de manufactura ayuda a resolver:

Decisiones de diseño

1. ¿qué tipo y cantidad de máquinas, equipo y herramientas se deben usar?
2. ¿cuánto personal operativo se necesita?
3. ¿cuál es la capacidad de producción (tasa de proceso) para una configuración dada?
4. ¿qué tipo y tamaño de sistemas de manejo de material se debe usar?
5. ¿qué tan grandes deben ser las áreas de almacenamiento?
6. ¿cuál es la mejor distribución de la planta?
7. ¿cuáles son los mejores controles de automatización?

8. ¿cuál es el tamaño de unidad de carga óptimo?
9. ¿qué métodos y niveles de automatización funcionan mejor?
10. ¿qué tan bien balanceada está una línea de producción?
11. ¿dónde están los cuellos de botella (análisis de restricciones)?
12. ¿cuál es el impacto de que una máquina salga de operación (análisis de confiabilidad)?
13. ¿cuál es el efecto del tiempo de puesta en marcha sobre la producción?
14. ¿el almacenamiento debe ser centralizado o localizado?
15. ¿cuál es el efecto de la velocidad de un vehículo o transportador sobre el flujo de las partes?

Decisiones operativas

1. ¿cuál es la mejor forma de planear el mantenimiento preventivo?
2. ¿cuántos turnos se necesitan para cumplir con los requerimientos de producción?
3. ¿cuál es el tamaño de lote óptimo?
4. ¿cuál es la secuencia de producción óptima para un grupo de tareas?
5. ¿cuál es la mejor forma de asignar recursos para un conjunto de tareas?
6. ¿cuál es el efecto de una política de mantenimiento preventivo con respecto de una política de mantenimiento correctivo?
7. ¿cuánto tiempo pasa un trabajo en especial dentro del sistema (análisis de tiempo de proceso)?
8. ¿cuál es el mejor método para controlar la producción? (kanban, mrp u otros)

Hay muchas aplicaciones de la simulación en los sistemas de manufactura que son comunes a varios sistemas (Harrell, 2003). Entre ellos:

- Análisis de métodos
- Distribución de planta
- Tamaño de lotes
- Control de producción
- Control de inventario
- Planeación de la cadena de suministro
- Control en tiempo real
- Emulación
- Planeación de la producción

Análisis de métodos

En esta aplicación se buscan formas alternas de procesar y transportar material. Por ejemplo, un proceso de ensamble puede hacerse completamente en una sola operación y con varias estaciones paralelas o, puede ser separado en varias etapas que se realicen en una sola línea de ensamble.

Una de las decisiones que corresponden al análisis de métodos es el tipo y nivel de automatización que se debe usar en la fábrica. La simulación ha sido especialmente útil en el diseño de sistemas automatizados, garantizando no trabajar con un desempeño subóptimo. Hay tres tipos de automatización a considerar en manufactura: automatización de operaciones, de transporte de

materiales y de información. El grado de automatización varía desde manual hasta completamente automático. El mejor enfoque de automatización es: 1. Simplificar, 2. Sistematizar y 3. Automatizar. Algunas empresas encuentran que después de simplificar y sistematizar, la necesidad de automatizar desaparece.

Distribución de planta

Dada la naturaleza de uso intensivo del equipo en los sistemas de manufactura, la distribución de la planta es importante para lograr un flujo suave del producto y los movimientos de los recursos a través de la instalación. La simulación ayuda a identificar patrones de flujo ineficientes y a crear mejores distribuciones. Una buena distribución resulta en un flujo directo con pocos movimientos que minimizan los costos de transporte y almacenamiento.

Tamaño de lote

Las decisiones sobre el tamaño del lote juegan un papel muy importante en el cumplimiento de las metas de eficiencia en una instalación de manufactura. Un lote se refiere a la cantidad de partes agrupadas para algún propósito en particular. Típicamente se habla de tres tipos de lotes en manufactura: lote de producción, lote de movimiento y lote de desplazamiento.

El lote de producción consiste en todas las partes de un tipo que comienzan a producirse antes de que un nuevo tipo de parte sea introducida al sistema. El lote de movimiento o transferencia es la colección de partes que se agrupan y se mueven juntas desde una estación de trabajo hasta otra. Un lote de producción usualmente se parte en varios lotes de movimiento. Esta práctica se llama partición del lote (lot splitting). El tamaño del lote de movimiento tiene que ser constante de locación a locación. En algunos sistemas de manufactura con lotes, por ejemplo, una técnica llamada traslape (overlapped) se usa para minimizar el tiempo ocioso de la maquinaria. En producción con traslape, un lote de movimiento llega a una estación de trabajo cuando las partes son individualmente procesadas. Y éstas son enviadas a la siguiente estación en lotes más pequeños o individualmente con el objetivo de mantener alimentada la siguiente operación. El lote de proceso es la cantidad de partes que están siendo procesadas simultáneamente en una operación en particular. Usualmente consiste en una sola parte.

La decisión sobre que tamaño usar para cada lote usualmente se basa en criterios económicos, costos internos de inventario, y economías de escala. Los grandes tamaños de lote usualmente resultan en bajos costos de puesta en marcha, costos de manejo y costos de proceso.

Control de producción

El control de producción gestiona el flujo de material entre estaciones de trabajo. La simulación ayuda a planear el método más efectivo y eficiente de hacerlo. Existen muchos controles que dependen de la situación, pero los comunes son:

- Control empujar (push)
- Control jalar (pull)
- Control dbr (drum-buffer-rope)

Control de inventario

El control de inventario involucra la planeación, agenda y entrega de partes para dar soporte a la actividad de producción. Debido al alto impacto económico de las decisiones de inventario, desarrollar y mantener un buen sistema de control es crítico. Otra decisión relacionada es dónde colocar los almacenes. Tradicionalmente el inventario se coloca en ubicaciones centralizadas para un mejor control. Desafortunadamente esta configuración crea más operaciones de manejo e incrementa los tiempos de respuesta. La tendencia actual es descentralizar el inventario hasta los puntos de uso.

Planeación de la cadena de suministro

Existen dos metas importantes con respecto a la administración de la cadena de suministro: reducir los costos y mejorar el servicio al cliente reduciendo el tiempo de entrega. Existen herramientas de análisis de la red de suministro que actúan de forma agregada e identifican ubicaciones y niveles de inventario óptimos, dada una demanda agregada. La simulación por otro lado permite indagar en el sistema a un nivel más detallado, analizando el impacto de las interdependencias y las variaciones sobre el tiempo.

Control en tiempo real

En los sistemas actuales de producción, la simulación se ha integrado a las celdas de manufactura para efectuar análisis en tiempo real como la selección de las tareas subsecuentes o decisiones dinámicas de ruteo. Inicialmente un modelo es construido para operar con una versión simulada de la celda, y después los componentes simulados de la celda son reemplazados por los componentes físicos.

Se tienen al menos tres beneficios al usar la simulación en tiempo real:

- La lógica usada en el simulador no necesita ser reescrita para el controlador
- Las capacidades de animación pueden conservarse para monitorear el proceso
- Las capacidades de recolección y análisis de la simulación generan estadísticos sobre las medidas de desempeño seleccionadas

Emulación

Un uso especial de la simulación en manufactura es la emulación de hardware. Un simulador funciona como emulador al recibir entradas del sistema a controlar (como plc's o microcontroladores), imitar la

lógica del controlador y retroalimentar señales de control. Por otro lado, el simulador también puede imitar la planta a controlar para realizar pruebas de operación de controladores físicos.

La emulación tiene los mismos requerimientos de operación que el control en tiempo real. El reloj de simulación debe ser sincronizado con el reloj de tiempo real para imitar los tiempos de maquinado y movimiento.

Planeación de la producción

La planeación de la producción determina los tiempos de inicio y fin de cada tarea. Algunas veces la planeación es estática y se determina previamente, otras veces la planeación se hace dinámicamente. La simulación ayuda a tomar decisiones para ambos tipos de planeación, al evaluar reglas de decisión programadas en el modelo. La simulación no hace el plan en sí, pero genera reportes con los resultados de una situación de operación dada.

La secuencia de las tareas es un reto frecuente para la manufactura que tiende a guiarse por las fechas de vencimiento de los pedidos. En la planeación de la producción, usualmente se requiere alcanzar las siguientes metas:

- Minimizar el retraso o latencia de las tareas
- Minimizar el tiempo de flujo o tiempo de producción
- Maximizar la utilización de los recursos
- Minimizar los costos de producción

3.3 Paradigmas de modelado

Un modelo de simulación es una representación en computadora de cómo interactúan y se comportan los elementos de un sistema en particular. Un paradigma de modelado consiste en los constructos y lenguaje asociados que le dicen al modelador cómo pensar acerca del sistema que está modelando.

Históricamente los simuladores requieren que el modelo se defina línea por línea, es decir generar una lista de instrucciones (script) para procesar las entidades. Los simuladores más modernos están orientados a procesos y soportan modelado por objetos (Harrell, 2003).

Conceptualmente el modelado basado en objetos es muy simple. Un objeto informático representa un objeto de la realidad, como una máquina, un operador, una parte o un cliente. Un objeto se define en términos de sus atributos y comportamiento. Los atributos esencialmente son variables asociadas con el objeto como su tamaño, condición, tiempo en el sistema, etc. Los atributos se usan para contener información relativa a objeto, ya sea para tomar decisiones o para generar reportes. Los atributos son actualizados durante la simulación para reflejar los cambios en los objetos. El comportamiento es

definido por la lógica operativa asociada con el objeto. Esta lógica es ejecutada cuando ciertos eventos ocurren o cuando son llamadas explícitamente por el modelo. Los objetos se organizan en clases de acuerdo a sus similitudes entre atributos y comportamiento. En este sentido todos los objetos de una clase heredan los atributos y comportamientos definidos por la clase. Esto simplifica la definición de los objetos y permite realizar cambios en forma rápida para un conjunto de objetos. También permite que los objetos sean reusados para otros modelos. El modelado orientado a objetos es consistente con las prácticas de la programación orientada a objetos.

Modelado de elementos estructurales

Generalmente los objetos del modelo representan elementos del sistema como maquinaria, personas, áreas de trabajo, etc. La siguiente es una clasificación de objetos:

- **Entidades.** Objetos procesados por el sistema
- **Locaciones.** Lugares donde las entidades son procesadas o almacenadas
- **Recursos.** Agentes usados para procesar entidades
- **Rutas.** El curso de viaje de las entidades y recursos en el sistema

Entidades

Las entidades son los objetos procesados en el modelo y representan las entradas y salidas del sistema. Las entidades pueden tener características especiales como velocidad, tamaño, condición, etc. Las entidades fluyen en una o varias rutas por el sistema y los procesos actúan sobre ellas. Pueden llegar desde fuera del sistema o pueden ser generadas internamente. Usualmente las entidades salen del sistema después de visitar una secuencia definida de locaciones.

Los modelos de simulación hacen uso de los atributos de las entidades. Por ejemplo una entidad puede tener un atributo llamado "condición", que tome valor 1 por defecto y 0 en otro caso. El valor de este atributo determina hacia donde es dirigida la entidad. Los atributos también se usan frecuentemente para recolectar información durante la simulación. Por ejemplo el modelador puede definir un atributo llamado "tiempovaloragregado" para testificar la cantidad de tiempo que pasa una entidad en las estaciones de trabajo.

¿Qué entidades incluir?

Cuando se decide qué entidades incluir en el modelo, lo mejor es revisar todos los tipos de entidades incluidas en el sistema. Por ejemplo si una parte se está ensamblando en otra, en una estación de trabajo y además la estación siempre tiene partes disponibles, probablemente no es necesario modelar este elemento. En este caso lo que es esencial es simular el tiempo para ejecutar el ensamble. En otro caso si la parte no siempre está disponible por retrasos, es necesario simular el flujo completo de las

partes. La regla es que si se puede capturar adecuadamente la dinámica del sistema sin incluir la entidad, mejor que no se incluya.

Cúmulo de entidades

En algunos sistemas de manufactura es común tener cientos de tipos de parte o en el caso de sistemas de servicio, cientos de tipos de clientes. Modelar cada una de estas entidades individualmente puede ser una tarea extenuante y sin sentido. Un mejor enfoque es tratar los tipos de entidades tan agregados como sea posible. Esto funciona especialmente bien cuando todas las entidades tienen la misma secuencia de proceso. Incluso si hay una ligera diferencia en el proceso, esta se puede modelar usando atributos o probabilidades.

Resolución de entidades

Cada persona o elemento individual en el sistema no necesariamente está representado por una entidad en el modelo. A veces un grupo de elementos pueden estar representados por una sola entidad. Por ejemplo un producto puede representar un lote. Si un grupo de entidades se procesan juntas y se mueven juntas no es necesario modelarlas individualmente. Los tiempos de actividad y los estadísticos que son función del tamaño del grupo pueden ser manejados usando un atributo que los represente.

Entidades con alta tasa de procesamiento

En algunos sistemas, especialmente en las industrias de alimentos es común procesar entidades a una tasa de cientos por minuto, en esta situación modelar cada entidad individualmente puede ralentizar significativamente la simulación. Para el procesamiento de entidades con grandes tasas en que el seguimiento individual no es crítico, es preferible simplemente testificar la producción en varias etapas del proceso usando variables o atributos en vez de entidades individuales. Un enfoque alternativo es ajustar la resolución de la entidad como se mencionó anteriormente.

Locaciones

Las locaciones son lugares en el sistema que se usan para procesar y almacenar entidades. Una locación puede ser un cuarto de tratamiento, estación de trabajo, fila de revisión o área de almacenamiento. Las locaciones tienen capacidad para contener entidades y pueden tener ciertos periodos en que están disponibles. También pueden tener entradas y salidas especiales como las basadas en reglas de prioridad. En simulación generalmente interesa el contenido promedio de una locación, como el número promedio de clientes en una fila o el número promedio de partes en un estante. También se puede estar interesado en cuanto tiempo pasan las entidades en una estación para un proceso en particular.

¿Qué locaciones incluir?

Decidir que locación modelar depende ampliamente de lo que sucede dentro de la locación. Si una entidad solamente pasa por la locación sin consumir tiempo probablemente no es necesario incluirla en el modelo. Las siguientes situaciones son una guía sobre qué locaciones modelar:

- Lugares donde una entidad se detiene por un periodo de tiempo específico para efectuar una actividad como inspección, fabricación o limpieza
- Lugares donde una entidad espera hasta que una condición se cumpla
- Lugar donde algunas acciones se ejecutan aunque no consuman tiempo como por ejemplo enviar una señal, separar o destruir una entidad o cambiar el valor de un atributo o variable
- Lugar donde se toma una decisión acerca del ruteo de una entidad

Resolución de las locaciones

Dependiendo del nivel de resolución que requiera el modelo una locación puede ser una fábrica entera o posiciones en un escritorio. La combinación de locaciones se efectúa de forma distinta dependiendo si se ubican en serie o en paralelo. Cuando se combinan locaciones en paralelo que tienen idénticos tiempos de procesamiento, la locación resultante tiene que tener una capacidad equivalente a la suma de las capacidades individuales. Sin embargo, el tiempo de actividad debe ser igual al de una de las locaciones. Una situación que varias locaciones se convivan de esta manera se le llama estación de trabajo paralela. Cuando se combinan locaciones en serie la locación resultante tiene una capacidad igual a la suma de las capacidades individuales y un tiempo de actividad igual a la suma de los tiempos individuales.

Recursos

Los recursos son los agentes usados para procesar entidades en el sistema. Los recursos pueden ser estáticos o dinámicos dependiendo si son estaciones como una fotocopiadora o se mueven en el sistema como un operador. Los recursos dinámicos se comportan como entidades y pueden ser animados o inanimados. Los recursos no tienen usualmente una secuencia y permanecen en el sistema.

En simulación nos interesa la forma que los recursos son utilizados, cuántos de ellos se requieren y como el proceso de entidades se afecta con la disponibilidad de éstos.

¿Qué recursos incluir?

La decisión sobre qué recurso debe modelarse depende ampliamente del impacto que tiene sobre el comportamiento del sistema. Si el recurso se dedica a una estación en particular, puede haber poco beneficio en incluirlo en el modelo debido a que las entidades nunca tendrán que esperar a que el recurso esté disponible. En este caso simplemente se asignara el tiempo de proceso a la estación de trabajo. Por otro lado, si el recurso no siempre está disponible o es un recurso compartido, probablemente debe ser incluido. Una vez más, la consideración es cuánto se afecta en el comportamiento del sistema.

Tiempo de traslado de un recurso

Una consideración cuando se modela el uso de recursos es el tiempo de traslado asociado con recursos móviles. Quien modela debe preguntarse si el recurso está disponible cuando se necesita o si hay un

desplazamiento involucrado. El tiempo para que el recurso llegue a la locación puede estar en función de la distancia en que debe recorrer.

Recursos consumibles

Dependiendo del propósito de la simulación y el grado de influencia en el sistema, puede ser deseable modelar recursos consumibles. Estos se usan durante la simulación e incluyen:

- Servicios como electricidad o aire comprimido
- Provisiones como grapas o herramientas

Los recursos consumibles regularmente se modelan como función del tiempo o como una función escalón asociado con un evento u operación. Esto puede hacerse definiendo una variable o atributo que cambien de valor con el tiempo o por un evento. Una variable que represente el consumo de materiales de empaque, por ejemplo, puede estar basada en el número de entidades procesadas en una estación de trabajo.

Recursos de transporte

Estos son recursos para mover entidades dentro de los sistemas, por ejemplo, las grúas, los elevadores, autobuses y aviones. Estos recursos son dinámicos y pueden mover varias entidades. A veces hay varios puntos de carga y descarga y pueden tener o no rutas preestablecidas.

En los sistemas de manufactura avanzada generalmente el elemento más difícil de modelar es el transporte o manejo de materiales. Esto es debido a la operación compleja de estos sistemas ya que están controlados por computadora. Los sistemas de transporte incluyen sistemas de cintas transportadoras y sistemas de vehículos guiados automáticamente (AGVS).

Trayectorias

Las trayectorias definen la secuencia de viaje de las entidades y recursos. Las trayectorias pueden ser aisladas o pueden conectarse para crear redes. Las trayectorias ligadas que forman redes son comunes en sistemas de manufactura y servicios. En manufactura se conectan pasillos para crear rutas de tránsito para grúas u otros transportadores de materiales. En algunos AGVS a veces se tienen trayectorias complejas para manejar el tráfico de vehículos. En los sistemas de servicios, las oficinas complejas tienen pasillos que conectan pasillos para llegar a los despachos. Cuando se usan redes de trayectorias a veces puede haber cientos de caminos para llegar de una locación a otra.

Elementos operativos

Los elementos operativos definen el comportamiento de los diferentes elementos físicos en el sistema y cómo estos interactúan. Los elementos operativos incluyen rutas, operaciones, arribos, movimientos de recursos y entidades, reglas de selección de tareas, agendas de recursos y tiempos de falla y reparación.

La mayoría de los elementos operativos de un modelo pueden ser definidos usando constructos provistos específicamente para el modelado de dichos elementos, sin embargo, hay situaciones en que se requiere el uso de lógica especial como estructuras "if" para lograr un comportamiento operativo en particular.

Rutas

Las rutas definen la secuencia del flujo de entidades de una locación a otra. Cuando las entidades terminan su actividad en una locación, el ruteo define cual es el siguiente paso para dicha entidad identidad y especifica el criterio de selección si existen varias posibilidades.

Recirculación

En ocasiones las entidades pasan por la misma locación varias veces. El mejor enfoque para modelar esta situación es usar un atributo de la entidad para testificar el número de veces que se visita la locación. Cuando se usa un atributo de entidad el atributo se incrementa aunque la entidad salga de la locación sin ejecutar ninguna operación.

Ruteo no ordenado

Ciertos sistemas no requieren una secuencia específica para visitar un conjunto de locaciones pero permiten que las actividades se ejecuten en cualquier orden siempre y cuando sean finalizadas. Un ejemplo es la firma de documentos por varias personas, donde la secuencia no tiene importancia siempre y cuando todas las firmas sean recabadas. En las situaciones de ruteo no ordenado es importante llevar un seguimiento de las locaciones que han sido visitadas y usualmente el enfoque más práctico es usar atributos de entidad.

Operaciones entre entidades

Una operación de entidad define lo que sucede cuando ésta arriba a una locación. Para propósitos de modelado la naturaleza de la operación no es importante, lo que es esencial es saber qué sucede en términos del tiempo requerido, los recursos usados y cualquier otra lógica que impacte el desempeño de sistema. Para operaciones que requieren más de una asignación de tiempo y recursos, es necesario detallar la lógica de asignación.

La operación entre entidades es una de muchas formas diferentes de actividades y como cualquier otra decisión, una operación entre entidades se basa en el impacto que tiene sobre el flujo completo. Por ejemplo si se ejecuta una actividad de etiquetado sobre entidades que circulan en una banda, la actividad no requiere ser modelada a menos que el etiquetado experimente interrupciones frecuentes.

Consolidación de entidades

A veces las entidades se involucran en operaciones donde son consolidadas o se conectan física o lógicamente con otras. Armar lotes o colocar piezas en un estante son ejemplo de consolidación de entidades. En estas situaciones las entidades simplemente se acumulan hasta que una cantidad específica se alcanza y entonces se agrupan en una sola unidad. La consolidación puede ser temporal y permitir que después se separen las unidades o puede ser permanente en cuyo caso las entidades nunca volverán a separarse.

Adjunción de entidades

Aparte de consolidar de entidades, las entidades también pueden ser adjuntadas a una locación o entidad específica. Por ejemplo cuando se adjunta documentos a una orden o cuando se ensamblan las ruedas a un chasis de automóvil. La diferencia entre adjuntar y consolidar es que para adjuntar debe haber una base existente.

Como en la consolidación, la adjunción puede ser permanente o temporal. Los siguientes son ejemplos de adjunción de entidades:

- Añadir componentes a un ensamble base
- Entregar una orden completa a un cliente que espera por ella
- Cargar material en un contenedor

División de entidades

En algunos procesos una sola entidad se convierte en dos o más entidades nuevas. Por ejemplo cuando una pieza se divide en piezas más pequeñas o una orden tiene copias que van siendo removidas para entregarse en diferentes aéreas. Las entidades se dividen en dos formas: cuando la entidad se divide y el original deja de existir y cuando la entidad solo se copia y continua existiendo.

Los siguientes son ejemplos de división de entidades:

- Un contenedor o tarima que se separa en elementos individuales
- Conducir y dejar un automóvil a un centro de servicio
- Separar una hoja de un documento multiforma
- Un cliente que da de alta una orden y ésta es procesada mientras el cliente espera
- Un material que es cortado en varias piezas

Arribo de entidades

El arribo de entidades define el tiempo, la cantidad, la frecuencia y la locación en que las entidades entran al sistema. Las entidades pueden llegar a un sistema de manufactura o servicio en una o varias formas:

- Periódica. Llegan en un intervalo periódico
- Planeada. Llegan en tiempos específicos
- Fluctuante. La tasa de arribo varía con el tiempo
- Por evento. Arriban cuando un evento es desencadenado

En cualquier caso las entidades pueden llegar individualmente o en lotes

Movimiento de entidades y recursos

Las entidades se mueven a través del sistema de locación en locación por medio del procesamiento. Los recursos se mueven entre locaciones cuando se les requiere. Adicionalmente, los recursos frecuentemente se mueven cuando siguen a las entidades en el sistema.

El movimiento puede ser manejado de tres maneras en el modelo de simulación:

- Ignorando el movimiento
- Modelando el movimiento con un solo evento (que puede ser definido por velocidad y distancia)
- Modelando el movimiento usando una red de trayectorias. Esto requiere que el movimiento de la entidad o recurso lidie con el tráfico de otras entidades o recursos

Uso de lógica de programación

A veces el comportamiento deseado del modelo no puede ser logrado usando las capacidades básicas del simulador. En estos casos, es necesario usar una lógica de programación que analice probabilidades, variables y atributos para tomar decisiones sobre el comportamiento.

Uso de probabilidades para modelar comportamiento estocástico

En algunas ocasiones los elementos operativos tienen comportamiento aleatorio y es necesario usar algunas reglas de ruteo según una distribución probabilística y una estructura del tipo "if". Por ejemplo,

en una estación de inspección y retrabajo se puede modelar un defecto en el producto del 10% y un tiempo de reparación de 3 ± 1 minutos uniformemente distribuido. Se usaría una expresión como la siguiente:

```
If rand() ≤ 0.10  
Then wait u(3,1) min
```

Una situación similar ocurre en los tiempos de actividad que tienen más de una distribución. Por ejemplo cuando una máquina que sale de operación 30% del tiempo toma una distribución triangular(0.2,1.15,3) minutos para repararla y 70% toma triangular (3,7.5,15)minutos. La lógica para la definición del tiempo de falla puede ser:

```
If rand() ≤ 0.3  
Then wait t(.2,1.5,3)min  
Else wait t(3,7.5,15)min
```

Uso de atributos para modelar una lógica especial

A veces una parte que ya ha pasado por una localidad y regresa, no requiere del mismo tiempo para ser retrabajada. En esta situación un atributo de la entidad puede ser la base de la decisión sobre cuántas veces una entidad en particular ha visitado una locación en particular. Por ejemplo la entidad puede tener un atributo llamado "pass" para testificar las veces que se ha visitado la locación. La implementación de esta lógica puede ser como la siguiente:

```
Inc pass  
If pass = 1  
Then wait 5 min  
Else wait 3 min
```

Uso de variables globales para recabar estadísticos

Las variables locales son contenedores de valores que cambian durante la ejecución de la simulación. Se les llama globales porque pueden ser leídas o escritas desde cualquier lugar y por cualquier objeto en el modelo. Un ejemplo de variable local es la que se define para testificar el contenido de una locación almacén. Se puede usar incrementándola cada vez que una entidad llegue a la locación y decrementándola cada vez que una entidad sale, con el propósito de saber el nivel de stock en cualquier momento.

Uso de variables locales para ciclos

Las variables locales están definidas solo en el ámbito de la lógica (objeto) donde son declaradas. Cuando el objeto termina su ejecución, el bloque de lógica en el cual la variable fue definida desaparece. Una variable local se puede pensar como un atributo temporal del objeto en el que es declarada y nos sirve para realizar cálculos temporales, por ejemplo, para llevar la cuenta de las veces que se ejecuta un ciclo. Suponiendo la siguiente situación: se requiere asignar el valor 4 a los primeros 10 elementos de un arreglo llamado "numofbins" que fue definido en el modulo de arreglos. Una posible solución es la siguiente:

```
Int count = 1
while count < 11 do
  {
    Numofbins(count)=4
    Inc count
  }
```


Capítulo 4. Caso Nissan motors ibérica s.a.

Introducción

La historia de Nissan se remonta a Kwaishinsha co., una fábrica de automóviles fundada por Masujiro Hashimoto en el distrito de Azabu-Hiroo, Tokio en 1911. Hashimoto era un pionero en la industria del automóvil de Japón. En 1914, un pequeño coche de pasajeros fue desarrollado con base en su propio diseño, y en el año siguiente el auto hizo su debut en el mercado bajo el nombre de Dat. Dat representa las primeras letras de los apellidos de los tres soportes principales de Hashimoto: Kenjiro Den, Rokuro Aoyama y Meitaro Takeuchi (Wikipedia, Nissan).

Jitsuyo jidosha co., ltd., otro precursor de Nissan, fue establecida en Osaka en 1919 para fabricar los vehículos Gorham de tres ruedas, diseñados por el ingeniero americano William R. Gorham. Las herramientas, los componentes y los materiales fueron importados por una compañía de los estados unidos, convirtiéndola en una de las más modernas de aquellos tiempos.

En 1931 Dat derivó en un nuevo auto compacto, el primer "Dattosan", que significa "hijo de Dat". Jidosha-Seizo Kabushiki-Kaisha ("fabricación del automóvil" en castellano) fue establecida el 26 de diciembre de 1933, asumiendo el control todas las operaciones para la fabricación de Datsun de la división Tobata co., ltd. Y su nombre fue cambiado a Nissan Motor co., ltd. El 1 de junio de 1934. El fundador fue Yoshisuke Aikawa. Él tenía grandes planes de producir en masa 10,000 ó 15,000 unidades por año, y estaba a punto de poner su plan en práctica. Nissan es una abreviatura de la expresión Nippon Sangyo (industrias japonesas).

El primer coche de pasajeros de tamaño pequeño Datsun salió de la planta de Yokohama en abril de 1935, y las exportaciones del vehículo a Australia también fueron lanzadas el mismo año. Los coches Datsun simbolizaron los avances rápidos de Japón en la industrialización moderna. En un movimiento para recuperarse del vacío tecnológico de los años de guerra, Nissan realizó una alianza estratégica con Austin motor co. Ltd. Del Reino Unido en 1952, y el primer Austin salió de la línea un año más tarde. Nissan fue el primer constructor japonés en recibir el premio Deming a la excelencia de ingeniería en 1960. Y en este período, Nissan enfatizaba en lograr una organización fuerte para apoyar la etapa siguiente de la compañía.

El Bluebird 1959 y el Cedric 1960 cautivaron a los compradores japoneses. En 1966, Nissan se fusionó con Price Motor co. Ltd., agregando los renombrados modelos Skyline y Gloria a su línea de productos, e incorporo a un personal excepcional de ingeniería que continuó la excelente tradición de las compañías aéreas de Nakajima y de Tachikawa, que previamente fabricaban motores de avión.

Nissan desarrollo su primer vehículo experimental de seguridad (ESV) en 1971 y ha adoptado un extenso programa de seguridad en sus vehículos a través de los años. Para prevenir la contaminación atmosférica, Japón hizo cumplir los más altos estándares de emisión de gases. Es por esto que Nissan desarrollo el sistema de convertidor catalítico de tres vías, la tecnología más prometedora disponible en aquella época.

Nissan comenzó tempranamente a desarrollar operaciones de fabricación fuera de Japón, comenzando por Taiwán en 1959 y el establecimiento de Yulon, México en 1961. En los años 80, Nissan estableció dos bases estratégicas en la fabricación fuera de Japón; Nissan motor manufacturing corp., en EE.UU. Y Nissan motor manufacturing en el Reino Unido. Hoy, funcionan plantas de fabricación y ensamble Nissan en 17 países alrededor del mundo.

Mirando al mercado japonés, Nissan inauguró en 1975 la planta de Kyushu que fue remodelada en 1992 con la tecnología más avanzada. Además, en 1994 entró en operación la planta de Iwaki para fabricar los nuevos motores V6. Nissan también enfatiza actividades relacionadas con el desarrollo de vehículos eléctricos, otras fuentes de energía limpias, y el reciclado. En 1993, Nissan celebró el 60 aniversario de la fundación de la compañía.

En 1999, mientras se encaraba una crisis financiera severa, Nissan emprende una alianza con Renault S.A. Esta alianza se firma en marzo 27 y es la primera que involucra a fabricantes de autos japoneses y franceses.

Nissan ha establecido plantas de fabricación, almacenamiento y desarrollo de producto en todos los continentes. La planta Nissan motor ibérica, S.A. (NMISA), inicia operaciones en enero de 1983. Esta instalación, ubicada en sector B, Calle 3, 77-111, Barcelona, España. Cuenta con una superficie de 1,005,000 metros cuadrados. En 2007 produjo 193,605 autos. Cuenta con 4,250 empleados que producen principalmente los siguientes cuatro modelos: Terrano (ET), Pathfinder (X61), Almera (HM) y van Primastar (X83).

Como la mayoría de las instalaciones de manufactura de automóviles, NMISA está dividida en tres grandes plantas: carrocería (body shop), pintura (paint shop) y ensamble (assembly o trim & chassis).

4.1 Carrocería

En esta sección de la planta se realiza el montaje de la carrocería de los modelos Terrano (et), Pathfinder (x61), Almera (hm) y Primastar (x83). Este proceso se lleva a cabo en tres líneas como se muestra en la figura 4.1.

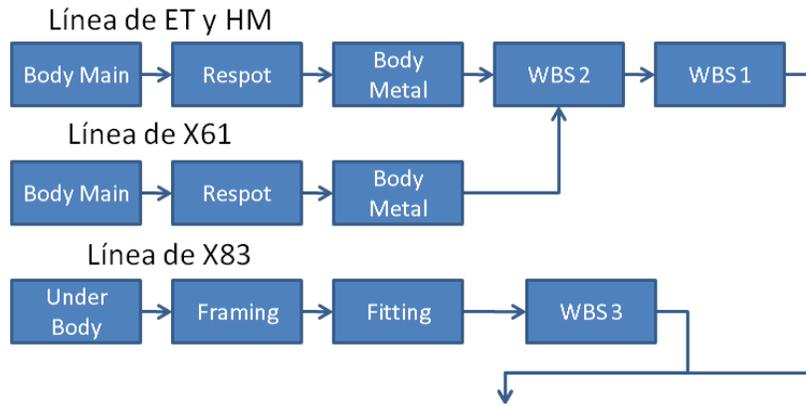


Figura 4.1. Líneas de ensamblaje de carrocería

Existe una línea para x83 y otra línea para x61. Los modelos et y hm se construyen de forma indistinta en una sola línea.

Para determinar cada una de las secciones que forman las líneas de ensamblaje se utiliza terminología diferente, aunque son equivalentes. Esta diferencia ha sido motivada por la entrada de Renault. Por lo tanto los procesos equivalentes son:

- Body main: under body
- Respot: framing
- Body metal: fitting

En las estaciones de body main y under body se monta la parte inferior de la carrocería de los vehículos. En las estaciones de respot o framing se monta el resto de carrocería (techo, laterales, puertas, toldo, etc.). Después de tener toda la estructura lista, los vehículos pasan por las líneas de body metal o fitting en los que se verifican y se ajustan. En esta misma sección, una vez que el vehículo pasa una inspección de calidad, se le pone el identificador que permitirá reconocerlo cuando transite por los diferentes puntos de control de la sección de pintura y ensamblaje.

Finalmente los vehículos pasan a los almacenes wbs. En el caso de la línea de la x83 todos los vehículos se dirigen al wbs3, pero en la línea de los et y hm hay dos almacenes. Primeramente esta línea era en la que se fabricaba el et y sólo había la wbs1, pero cuando se incorporó a la misma línea la fabricación del hm, se puso un nuevo almacén (wbs2) antes de wbs1.

No todos los almacenes wbs tienen fijo el número de carriles asignados a cada uno de los modelos. Los almacenes wbs1 y wbs3 son el punto de unión entre carrocería y pintura. La primera planta se encarga de llenar los buffers y la segunda planta saca los vehículos siguiendo la secuencia marcada.

En forma general la secuencia de ensamble de carrocería es la siguiente:

1. **Ensamble motor-transmisión.** Motor, transmisión, electrónica de control, eje delantero, caja de cambios, eje trasero, soporte de amortiguadores.
2. **Compartimento del motor.** Firewall, laterales internos, barras, salpicaderas.
3. **Compartimento trasero.** Toldo, tablero, cajuela, salpicaderas
4. **Piso.** Piso frontal, piso trasero.
5. **Chasis.** Compartimento del motor, compartimento trasero, piso, laterales, salpicaderas, cajuela, puertas, tapa del cofre.



Imagen 4.1. Ensamble motor-transmisión

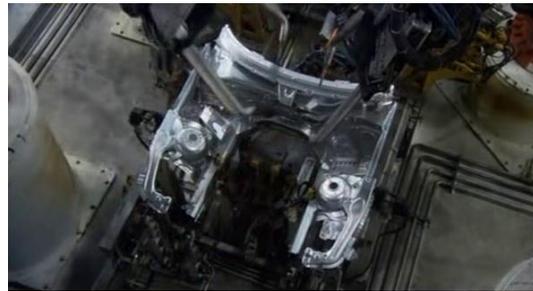


Imagen 4.2. Ensamble compartimento del motor



Imagen 4.3. Ensamble compartimento trasero



Imagen 4.4. Ensamble del piso



Imagen 4.5. Ensamble del chasis

4.2 PINTURA

El taller de pintura incluye las plantas de pintura p1 y p2. Las dos plantas están situadas una al lado de la otra. Este hecho se debe principalmente porque una parte de la línea de producción se encuentra exclusivamente en la planta p2. Todos los vehículos, al inicio del proceso deben pasar primero por p2. Después una parte seguirán para p2, y el resto, se desviarán hacia p1.

La figura 4.2 muestra el diagrama de flujo de los vehículos en la planta de pintura. En la planta p2 se localiza la fase inicial del proceso de pintura: el común p2. En esta zona se realiza el desengrasado y lavado de las carrocerías y los diversos tratamientos que se deben realizar a la carrocería antes de que ésta se pinte. Todos estos procesos son indispensables para cada uno de los modelos fabricados en la planta. Sin embargo, debido a que se pueden realizar en cierta celeridad, hacen que difícilmente se conviertan en un cuello de botella de línea de pintura. Los cuatro modelos pasan por la misma línea hasta que se acaban los tratamientos previos a la pintura.

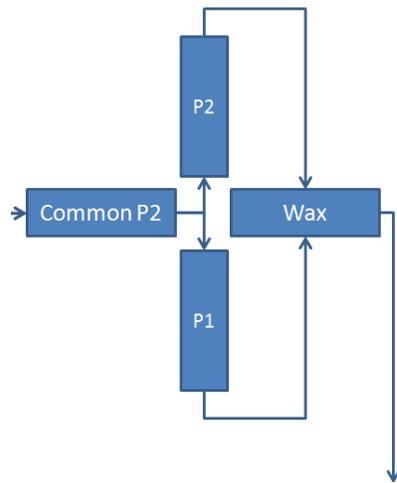


Figura 4.2. Plantas de pintura p1 y p2

Una vez finalizados estos procesos, algunos modelos son desviados hacia la planta p1 y otros se mantienen hasta terminar el proceso de pintura en la planta p2. La van x83 debe ser desviada forzosamente a la planta p1 debido a su gran volumen. No sucede lo mismo con los otros modelos fabricados, los cuales pueden ir indistintamente en cualquiera de las dos plantas. No obstante, la política seguida en la actualidad es priorizar la carga de trabajo de la planta p2, ya que así no se deben desviar a los vehículos. Una vez llegan al final de los procesos de p1 y p2, se trasladan todos los vehículos hacia la sección de ceras. Y finalmente se transportan a los almacenes pbs en la entrada de la planta de ensamble.

La actividad principal de este taller es pintar las carrocerías de los cuatro modelos fabricados. En la planta de pintura, las carrocerías son pintadas en un ambiente semiesterilizado usando solventes. Las carrocerías son sumergidas en tanques químicos para eliminar cualquier residuo graso que pudiera haber

sido recogido en los procesos anteriores. Una vez que han sido limpiadas, se sumergen en un tanque que contiene una pintura anticorrosiva llamada ED (dip de recubrimiento electrostático). Este “dip” cubre completamente la estructura por dentro y por fuera y es la primer cobertura de pintura que recibe la carrocería. Para finalizar esta etapa, cada estructura es horneada y llevada a la estación de sellado donde se colocan las juntas de los paneles interiores, el piso, la cajuela, el toldo. También se usa con un sellador con base de pvc para evitar la entrada de agua y la corrosión. También en esta zona se añaden almohadillas al piso y a la cajuela (práctica estándar en la industria automotriz) para amortiguar el ruido producido al operar.

El siguiente puesto es el de sellado inferior. Es parecido al sellado anterior pero se efectúa sobre las estructuras inferiores de la carrocería. Un robot aplica el mismo sello con base en pvc sobre las salpicaderas y la cara inferior de la carrocería. También se usan robots para aplicar el SGC (stone guard coat), una solución que le da resistencia a la abrasión a las salpicaderas. En esta etapa el auto es una vez más horneado y llevado a la estación de inspección de cubrimiento ED, donde se verifica que no exista ninguna imperfección en el escudo de protección electrostática ed.

A continuación se visita la zona de “superficie” donde la estructura recibe segunda capa de pintura y se hornea; además de pasar por una etapa de inspección de superficie.

En la estación de cobertura final, la estructura recibe la última capa de pintura formada por una capa de color y una capa transparente. Antes de el proceso final de horneado, la carrocería es inspeccionada por última vez.

Colores

El color o aplicación de acabado es opaco totalmente y es de una simple capa de entre las 15-25 micras, su secado se realiza en un tiempo de 5 minutos. El color es una mezcla de varias tintas de colores llamadas tintas base las cuales se mezclan en una proporción específica. Cada tinta tiene un valor distinto en la mezcla. Como se mencionó anteriormente la pintura es con base de solvente y para pasar de un color a otro es necesario un lavado. Una adecuada selección en la secuencia de colores a ser aplicados puede mejorar el desempeño de esta sección. A continuación se muestran los colores que se pueden aplicar a los modelos que estamos analizando.



Figura 4.3. Gama de colores

En forma general la secuencia de en la planta de pintura es la siguiente:

1. Lavado para quitar grasa y residuos
2. Pintura electrostática por sumersión
3. Horno 1
4. Estación de sellado, segundo horno, inspección, cepillado, retirar pelusas
5. Cabina de impresión con vapor de pintura electrostática
6. Horno 3
7. Inspección, cepillado, retirar pelusas
8. Esmalte
9. Horno 4
10. Capa final
11. Horno 5
12. Inspección final



Imagen 4.6. Lavado de la chasis



Imagen 4.7. Inmersión e-coat



Imagen 4.8. Primera introducción al horno



Imagen 4.9. Limpieza de residuos

4.3 Ensamble

En el taller de pintura, se trabaja durante dos turnos al día. Durante este tiempo se alimentan los almacenes pbs de la entrada del taller de ensamble. Las dos líneas, la de pintura y la de montaje, se mueven a diferente velocidad. En ensamble se trabaja paralelamente con los modelos fabricados y no representa un cuello de botella. Por esta razón, el objetivo principal del taller de pintura es asegurar un volumen concreto de vehículos por cada uno de los modelos. Este volumen varía en función de la demanda.

La figura 4.4 muestra el diagrama de flujo de la planta de ensamble. Puede verse que hay tres líneas paralelas donde a cada carrocería se van añadiendo partes internas (trim) y externas (chassis). Es aquí donde se instala el tren inferior, el motor y la carrocería.

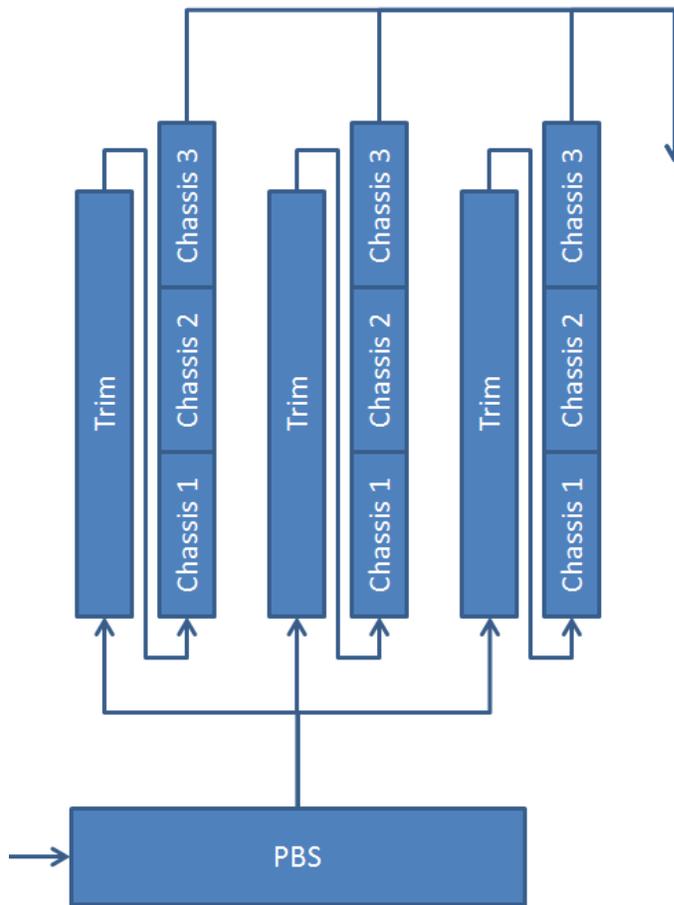


Figura 4.4. Planta de ensamble

Como ejemplo de la interacción pintura-ensamble, supongamos que la producción diaria en el montaje de terranos es igual a 100 unidades. Sumando un 20% como coeficiente de seguridad, se obtienen 120

unidades al día. Suponiendo que en el almacén pbs hay 70 unidades. Esto indica que en el primer turno debemos asegurar un flujo mínimo de 50 unidades. Ahora bien, si al día siguiente queremos empezar la jornada laboral con las mismas condiciones, se deberá llenar otra vez el almacén pbs. Esta tarea es la que se realiza en el turno de tarde del taller de pintura, donde las carrocerías pintadas se ubican en el almacén pbs en espera de entrar en el taller de ensamble el día siguiente por la mañana.

Cuando se producen averías poco importantes, donde la línea de pintura permanece parada poco rato, el inventario de seguridad mantiene un volumen mínimo de vehículos para que ensamble no tenga que parar. No obstante, si la avería ha sido importante y la línea ha estado más de dos horas parada, el inventario de seguridad no será suficiente. Y aunque el taller de ensamble no parará inmediatamente ya que en el almacén pbs contendrá un volumen importante de vehículos, llegará un momento en que se vaciará, ya que la línea de montaje se mueve más rápidamente que la línea de pintura.

El almacén pbs, aparte de utilizarse como almacén de entrada de ensamble, también intenta ordenar el mix de producción. Esto se debe a que en el taller de pintura el mix se desordena con mucha facilidad. Es más, este fenómeno se convierte en una de las principales problemáticas de la línea. La producción dentro del taller de pintura no sigue un único camino, ya que se bifurca en más de una ocasión. Además en la misma línea se producen ciertos bucles que no son recorridos por la totalidad de vehículos. Aparte, dentro de las plantas p1 y p2 hay almacenes que permiten sacar los vehículos de los hornos, en caso de averías en la línea o por finalización del turno (en caso de que los vehículos permanezcan más tiempo del apropiado dentro de los hornos les causarían daños irreparables) ahora bien, la inserción de los vehículos otra vez dentro de la línea no es del todo automática, lo cual origina también que se pierda la secuencia del mix. Además, la capacidad del pbs no es suficiente para almacenar todos los vehículos que produce el taller de pintura cuando ensamble no trabaja. En estos casos, se debe utilizar la zona de boxes como almacén. No habría excesivos problemas si la inserción de los vehículos al inicio del turno del día siguiente se realizara automáticamente siguiendo una política fija. Pero no sucede de este modo. La inserción de los vehículos en la línea principal está a cargo de los operarios que los mueven manualmente a través de los siete carriles que dispone la zona de boxes. Todos estos elementos provocan que se pierda la secuencia del mix de producción de cada modelo.

La jornada laboral de los trabajadores del taller de pintura varía en función de su posición en la línea. Así, los operarios del principio de la línea empiezan y terminan 45 minutos antes de que los operarios de los últimos procesos de la línea.

Las paradas programadas se efectúan durante los turnos de trabajo. Se hacen coincidir con los periodos de cambio de turno y durante las comidas. En estas paradas se aprovecha para limpiar las máquinas que se encuentran dentro de la línea de producción del taller de pintura. No obstante, para poder trabajar cómodamente deben dejar suficiente espacio entre vehículos. Un total de tres espacios por cada parada. Teniendo en cuenta que se efectúan hasta 6 paradas dentro de una jornada laboral, se habrán perdido hasta 18 espacios a lo largo de todo un día. Naturalmente, esta pérdida de espacios en la línea de producción, implica una pérdida de productividad. No obstante, para no perder producción, se aumenta la velocidad de la línea hasta llegar otra vez a la producción teórica por día.

También se aumenta, ligeramente, la velocidad la línea de producción para contrarrestar las microaverías que se producen en las diferentes estaciones de trabajo. De esta manera, se produce por encima de la producción teórica en previsión de las futuras micro interrupciones. Si la eficiencia de la línea se encuentra sobre el 97%, se aumenta la velocidad de la línea un 3% para contrarrestar esta pérdida en la producción.

1. Trim.

- a. Remoción de las puertas, instalación de aislante de ruido, alfombras, toldo
- b. Vestiduras, instalación de los arneses eléctricos, cableado eléctrico, panel de instrumentos
- c. Asientos, instalación del booster y cilindro maestro, así como las líneas de frenos, instalación del tanque y líneas de gasolina, instalación del conjunto de faros delanteros, radiador y evaporador del a/c
- d. Instalación de cristales y sellos, molduras, instalación de defensas trasera y delantera, mecanismos de puertas



Imagen 4.15. Alfombras y aislantes de ruido



Imagen 4.16. Instalación de panel frontal



Imagen 4.17. Instalación de dispositivos en posición inferior

2. Chassis

- a. Instalación del escape, conexión y torqueado de líneas de freno
- b. Instalación de asientos
- c. Instalación del motor, transmisión y suspensiones trasera y delantera
- d. Instalación de llantas
- e. Llenado de los depósitos de líquido de frenos, anticongelante, dirección hidráulica,
- f. Líquido limpiaparabrisas, llenado de gasolina
- g. Alineación de llantas y faros delanteros, prueba de rodado



Imagen 4.18. Instalación de las líneas de frenado



Imagen 4.19. Instalación de asientos



Imagen 4.20. Unión del tren de potencia con el chasis terminado



Imagen 4.21. Instalación de llantas

Datos sobre flujo y capacidades en la planta

En este apartado se muestran los datos básicos que permiten modelar el flujo de las partes a lo largo de toda la planta.

PLANTA	SECCIÓN	VEHÍCULO	CAPACIDAD	TIEMPO PROMEDIO [min]
Body Shop	Body Main	ET	3	80
Body Shop	Body Main	HM	3	80
Body Shop	Body Main	X61	3	80
Body Shop	Body Main	X83	2	80
Body Shop	Respot	ET	3	250
Body Shop	Respot	HM	3	250
Body Shop	Respot	X61	3	250
Body Shop	Respot	X83	2	250
Body Shop	Body Metal	ET	3	40
Body Shop	Body Metal	HM	3	40
Body Shop	Body Metal	X61	3	40
Body Shop	Body Metal	X83	2	40
Body Shop	WBS	ET	50	
Body Shop	WBS	HM	55	
Body Shop	WBS	X61	50	
Body Shop	WBS	X83	40	

Tabla 4.1. Datos de tránsito por el taller de carrocería

PLANTA	SECCIÓN	VEHÍCULO	CAPACIDAD	TIEMPO PROMEDIO [min]
Paint Shop	Common P2	ET	5	180
Paint Shop	Common P2	HM	5	180
Paint Shop	Common P2	X61	5	180
Paint Shop	Common P2	X83	5	180
Paint Shop	P1	ET	1	360
Paint Shop	P1	HM	1	360
Paint Shop	P1	X61	1	360
Paint Shop	P1	X83	1	360
Paint Shop	P2	ET	5	360
Paint Shop	P2	HM	5	360
Paint Shop	P2	X61	5	360
Paint Shop	P2	X83	[NA]	[NA]
Paint Shop	WAX	ET	6	210
Paint Shop	WAX	HM	6	210
Paint Shop	WAX	X61	6	210
Paint Shop	WAX	X83	6	210

Tabla 4.2. Datos de tránsito por taller de pintura

PLANTA	SECCIÓN	VEHÍCULO	CAPACIDAD	TIEMPO PROMEDIO [min]
Trim & Chassis	PBS	ET	200	-
Trim & Chassis	PBS	HM	200	-
Trim & Chassis	PBS	X61	200	-
Trim & Chassis	PBS	X83	200	-
Trim & Chassis	Trim	ET	5	480
Trim & Chassis	Trim	HM	5	480
Trim & Chassis	Trim	X61	5	480
Trim & Chassis	Trim	X83	5	480
Trim & Chassis	Chassis	ET	5	230
Trim & Chassis	Chassis	HM	5	230
Trim & Chassis	Chassis	X61	5	230
Trim & Chassis	Chassis	X83	5	230

Tabla 4.3. Datos de tránsito por el taller de ensamble

Demanda

El número de autos que se arman de un color y un modelo específico depende en gran medida de la forma en que se integra la demanda. Como se revisó en el capítulo dos la demanda puede provenir de pedidos en firme desde la red de distribuidores, lo que ocasionara bloques muy pequeños de modelos y colores. Si la demanda proviene de los pronósticos de ventas, típicamente los bloques serán más grandes y un poco menos variables en cuanto a colores. En otro caso por ejemplo, si se vendiera una flotilla grande para autos utilitarios, la demanda sería bastante uniforme durante algunos turnos.

Otro aspecto que puede afectar el número de modelos y colores que se van a ensamblar es la disponibilidad de insumos para los modelos planeados. La siguiente tabla muestra parte de una hoja de producción con los modelos y colores estudiados.

VEHÍCULO	BLANCO	PLATA	ROJO BURDEOS	AZUL LIGERO	SANDSTONE	COCOA	DEMANDA TOTAL
Terrano (ET)	5	8	4	4	2	2	25
Almera (HM)	26	43	22	22	14	10	137
PathFinder (X61)	45	75	39	39	24	18	240
Primastar (X83)	60	100	52	52	32	24	320
	136	226	117	117	72	54	722

Tabla 4.4. Demanda por modelos y colores para un bloque de trabajo

Esta información de la demanda nos servirá para crear una serie de arribos en un modelo de Promodel que nos permita estudiar la plata de pintura de NMISA.

Como se puede apreciar en este capítulo, la variabilidad y la complejidad de un sistema de producción automotriz con altas. Hay que coordinar miles de procesos y miles de insumos. Sin embargo, en el siguiente capítulo veremos cómo modelar algo de esta complejidad y como simplificar gran parte en búsqueda de un modelo que se enfoque sólo en los cambios en la plata de pintura.

Capítulo 5. Diseño del modelo

Introducción

Es precisamente el taller de pintura el que se ha elegido para simular el impacto que pueden tener las decisiones sobre la secuenciación de tareas. Aquí también se muestran algunos datos que son la base para la construcción del modelo en Promodel que se presenta en el capítulo cinco, donde se presentan secuencialmente los pasos que se siguieron para modelar la simplificación de la planta NMISA y se concluye presentando una serie de criterios de desempeño que servirán para hacer la comparación entre las distintas formas de secuenciar un trabajo.

Cuando se está construyendo un modelo de simulación, frecuentemente surgen dudas sobre si incluir un elemento o no. Y de incluirlo, ¿se debería modelar toda su funcionalidad o solo una parte?. En el capítulo tres se mostraron algunos criterios de elegibilidad de elementos estructurales. En el presente capítulo, usando la información de la planta NMISA, se mostrará cuales elementos fueron modelados, y cómo fueron introducidos en Promodel.

A continuación se presenta una forma de proceder al introducir un modelo en Promodel. No es una regla general pero es una forma de ir agregando complejidad al modelo.



Diagrama 5.1. Secuencia de modelado

Como primer grupo de elementos se recomienda armar la estructura del modelo con el layout, las locaciones, las entidades y de ocuparse, redes y recursos. En esta primera aproximación no es necesario declarar con exactitud la capacidad de las locaciones o el número de entidades.

Como segunda aproximación se recomienda declarar la secuencia de las entidades por las locaciones y programar los arribos.

En un tercer paso, hay que afinar los detalles de la capacidad de las locaciones, verificar las reglas y hacer la lógica de movimiento y de operaciones.

Si el modelo tiene varias excepciones o reglas complicadas, es recomendable el uso de técnicas de modelado que involucren atributos, variables, arreglos, macros y subrutinas.

Finalmente, sin ser un proceso exhaustivo, se recomienda hacer pruebas de congruencia con la lógica del proceso real, de tal forma que surjan discrepancias y errores.

5.1 Elementos básicos del modelo

Locaciones

En la figura 5.1 se muestra el flujo que siguen las partes durante su ensamble. De todas las estaciones de trabajo que se muestran, solo algunas van a ser modeladas como locación. La primer razón para esto es que el objeto de estudio de este trabajo son las asignaciones de tareas de la planta de pintura, por lo que modelar exhaustivamente otras entidades puede no ser productivo. La segunda razón es que son tareas altamente automatizadas que tienen variaciones despreciables y tienen una tasa muy baja de fallos.

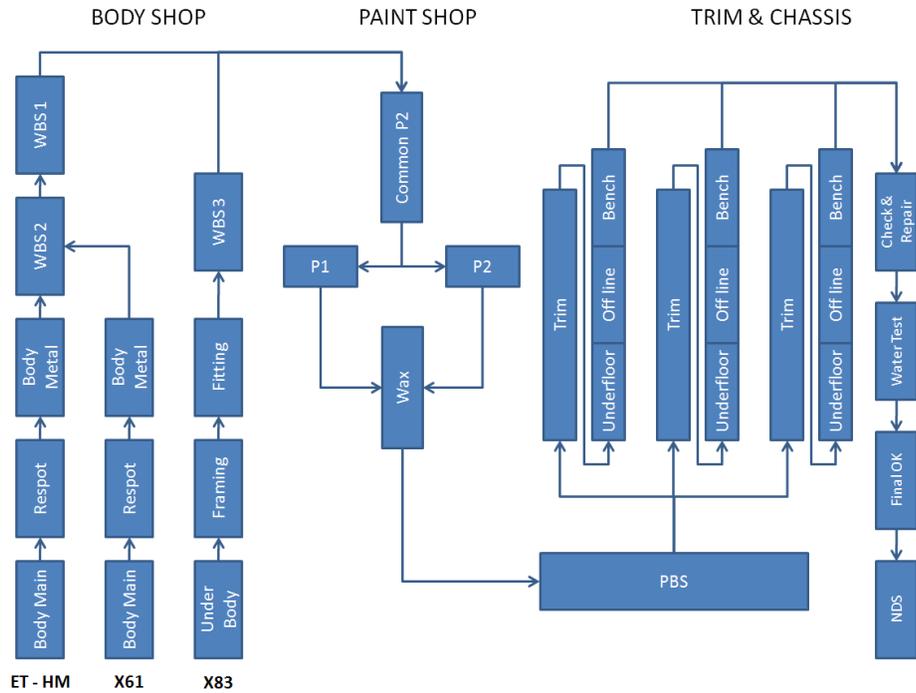


Figura 5.1. Flujo completo de la planta NMISA

En la figura 5.2 se muestran las locaciones que van a ser modeladas en Promodel. Como se puede apreciar, ya están ubicadas sobre un layout de NMISA. Se consideraron tres locaciones de entrada donde arribarán los autos que se van a ensamblar. En este modelo no se simularán cambios de turno ni se considerarán condiciones iniciales de inventario. Tampoco se toman en cuenta tiempo de setup ni fallas ni mantenimiento.

Los almacenes wbs, pbs y nds fueron modelados debido a que representan lugares donde puede contabilizarse tanto el trabajo en proceso como el trabajo terminado. Los cuatro elementos del paint shop fueron modelados porque es aquí donde se requiere el mayor detalle. En la planta de trim & chasis solo se consideró una locación por línea porque en este modelo no nos interesa el detalle del proceso de instalación de interiores ni el terminado total.

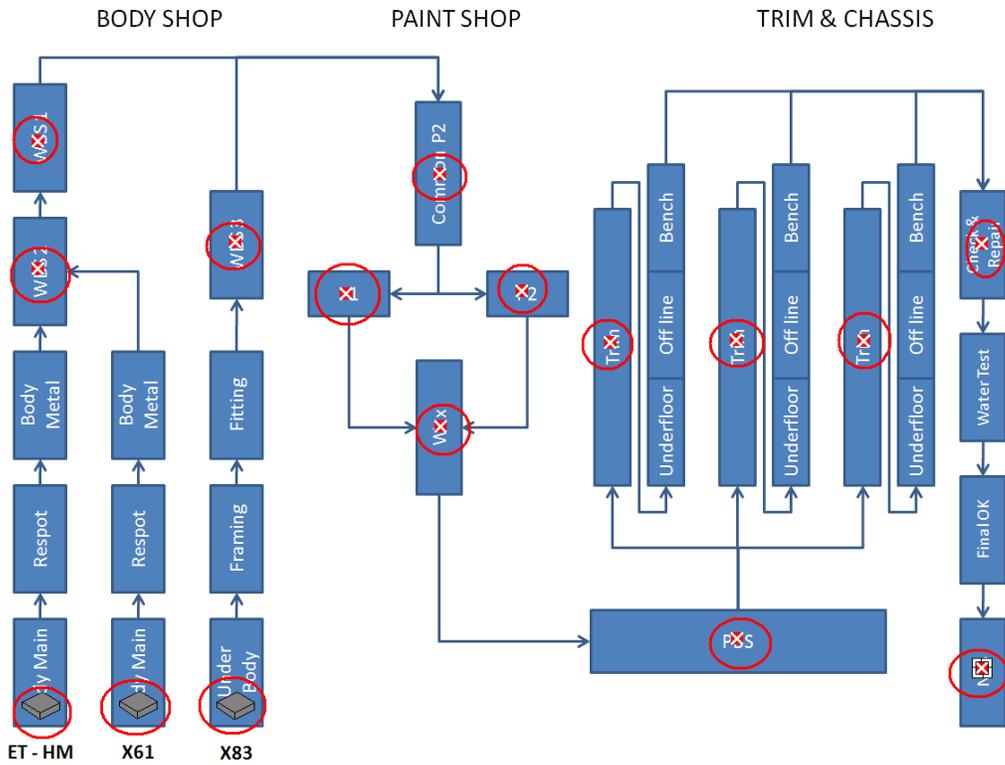


Figura 5.2. Locaciones que serán modeladas en el layout de NMISA

Aparte de la representación gráfica de la locación y el nombre con la que el programa identificará a ésta, es importante definir la capacidad (número de entidades que pueden estar al mismo tiempo) de cada locación y las unidades (entidades que procesa a la vez).

La siguiente tabla resume las locaciones y las propiedades que fueron alimentadas a Promodel.

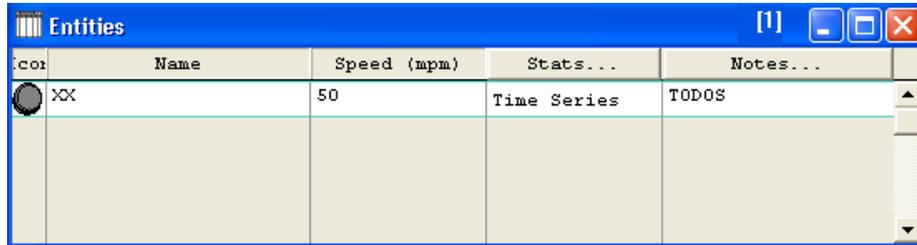
Icon	Name	Cap.	Units	Dts...	Stats...	Rules...	Notes...
	IniTerranoAlmera	5	1	None	Time Series	Oldest	
	IniPathFinder	3	1	None	Time Series	Oldest	
	IniVan	3	1	None	Time Series	Oldest	
	WBS1	50	1	None	Time Series	Oldest	
	WBS2	50	1	None	Time Series	Oldest	
	WBS3	50	1	None	Time Series	Oldest	
	P0	5	1	None	Time Series	Oldest	
	P1	1	1	None	Time Series	Oldest	
	P2	5	1	None	Time Series	Oldest	
	Wax	6	1	None	Time Series	Oldest	
	PBS	200	1	None	Time Series	Oldest	
	TrimChassTerranoAlmera	5	1	None	Time Series	Oldest	
	TrimChassPathFinder	5	1	None	Time Series	Oldest	
	TrimChassVan	5	1	None	Time Series	Oldest	
	CheckRepair	5	1	None	Time Series	Oldest	
	NDS	5	1	None	Time Series	Oldest	

Tabla 5.1. Locaciones que serán modeladas y sus propiedades

Entidades

En este modelo se consideran un tipo de entidad, la “xx”, que representa cualquier tipo de auto. Como se verá en el apartado de atributos, cada entidad xx tiene asociados dos atributos que las diferencian en cuanto a color y modelo de auto.

La siguiente tabla muestra la forma en que las entidades fueron representadas en el sistema:



Icon	Name	Speed (mpm)	Stats...	Notes...
	xx	50	Time Series	TODOS

Tabla 5.2. Entidad que será modelada

Como se puede apreciar en la figura 5.3, cada entidad tiene un atributo adicional que representa cuál de los diferentes colores le corresponde.

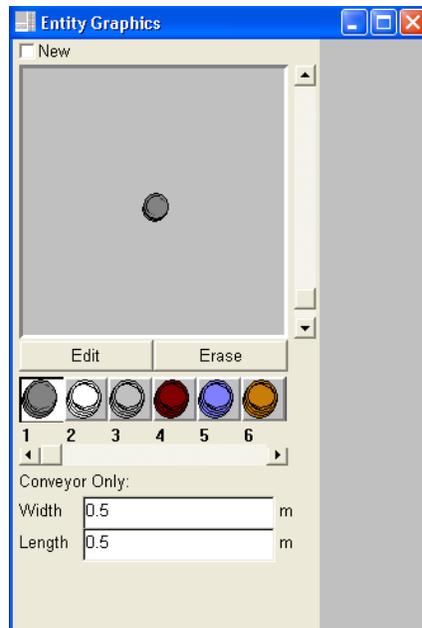
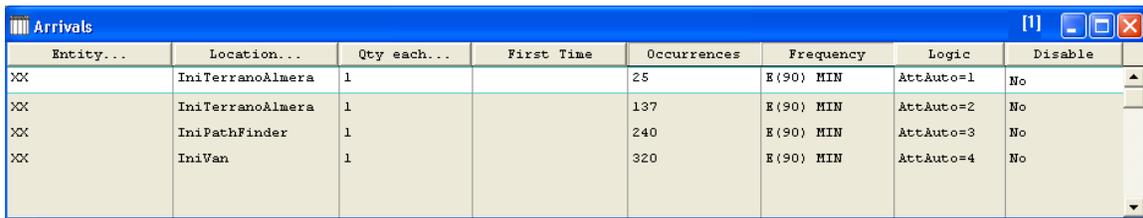


Figura 5.3. Entidades y sus colores en el sistema NMISA

Arribos

Como ya se vio en capítulos anteriores un arribo representa el evento discreto de la llegada de una entidad al sistema. En este caso se considera que un conjunto completo de insumos para cada modelo llega a la planta con una distribución exponencial con media en 90 minutos. El campo “ocurrencias” se usa para determinar cuántas veces va a ocurrir el arribo. Los valores que se usan en este caso representa la demanda total de cada modelo.

Esta es una simplificación extrema de la logística de abastecimiento de la planta, pero nos sirve como punto de partida para el análisis principal que es la planta de pintura.



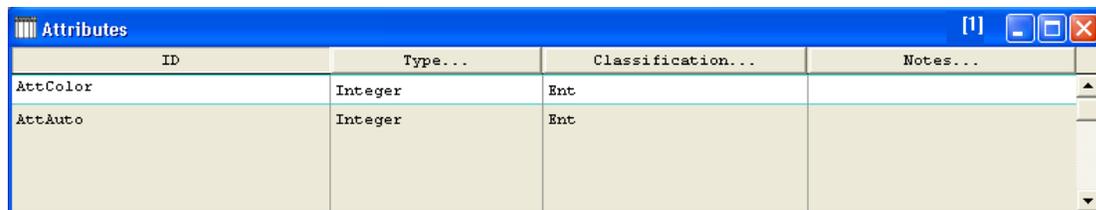
Entity...	Location...	Qty each...	First Time	Occurrences	Frequency	Logic	Disable
XX	IniTerranoAlmera	1		25	E (90) MIN	Att&Auto=1	No
XX	IniTerranoAlmera	1		137	E (90) MIN	Att&Auto=2	No
XX	IniPathFinder	1		240	E (90) MIN	Att&Auto=3	No
XX	IniVan	1		320	E (90) MIN	Att&Auto=4	No

Tabla 5.3. Arribos que serán modelados

Atributos

Como se mencionó anteriormente, los atributos de las entidades de tipo “xx” son lo que permite diferenciar precisar un modelo de auto y un color de pintura en particular.

En la tabla 5.4 se puede apreciar la definición de los atributos.



ID	Type...	Classification...	Notes...
AttColor	Integer	Ent	
AttAuto	Integer	Ent	

Tabla 5.4. Atributos de la entidad básica xx

Los atributos son análogos a las variables, pero se definen asociados a una entidad. En este caso son de tipo entero y pueden tomar los siguientes valores:

Atributo asociado al color:

- Si attcolor=1 el auto no se ha pintado
- Si attcolor=2 el auto será de color blanco
- Si attcolor=3 el auto será de color plata
- Si attcolor=4 el auto será de color rojo
- Si attcolor=5 el auto será de color azul
- Si attcolor=6 el auto será de color arena
- Si attcolor=7 el auto será de color café

Atributo asociado al tipo de auto:

- Si attauto=1 el modelo de auto es Terrano
- Si attauto=2 el modelo de auto es Almera
- Si attauto=3 el modelo de auto es Pathfinder
- Si attauto=4 el modelo de auto es Primastar

Variables globales

La tabla 5.5 muestra las variables globales que se van a estar actualizando mientras el sistema se encuentra en modo de ejecución. Estas variables sirven para monitorear el estado del sistema y tomar decisiones con base en su valor.

Icon	ID	Type...	Initial value	Stats...	Notes...
Yes	ET_B	Integer	0	Time Series	
Yes	ET_P	Integer	0	Time Series	
Yes	ET_R	Integer	0	Time Series	
Yes	ET_Z	Integer	0	Time Series	
Yes	ET_A	Integer	0	Time Series	
Yes	ET_C	Integer	0	Time Series	
Yes	HM_B	Integer	0	Time Series	
Yes	HM_P	Integer	0	Time Series	
Yes	HM_R	Integer	0	Time Series	
Yes	HM_Z	Integer	0	Time Series	
Yes	HM_A	Integer	0	Time Series	
Yes	HM_C	Integer	0	Time Series	
Yes	X6_B	Integer	0	Time Series	
Yes	X6_P	Integer	0	Time Series	
Yes	X6_R	Integer	0	Time Series	
Yes	X6_Z	Integer	0	Time Series	
Yes	X6_A	Integer	0	Time Series	
Yes	X6_C	Integer	0	Time Series	
Yes	X8_B	Integer	0	Time Series	
Yes	X8_P	Integer	0	Time Series	
Yes	X8_R	Integer	0	Time Series	
Yes	X8_Z	Integer	0	Time Series	
Yes	X8_A	Integer	0	Time Series	
Yes	X8_C	Integer	0	Time Series	
No	IntColor	Integer	0	Time Series	
No	IntColorPrevio	Integer	0	Time Series	
No	DblCosto	Real	0	Time Series	
No	IntTipoAuto	Integer	0	Time Series	

Tabla 5.5. Variables usadas en el modelo

- Et_px. Número de carrocerías Terrano que serán pintadas de color x
- Hm_px. Número de carrocerías Terrano que serán pintadas de color x
- X6_px. Número de carrocerías Terrano que serán pintadas de color x
- X8_px. Número de carrocerías Terrano que serán pintadas de color x
- Intcolor. Número de color que se está pintando en un momento dado
- Intcolorprecio número de color que se pintó con anterioridad al momento actual
- Dblcosto. Costo total de la operación durante la simulación
- Inttipoauto. Tipo de auto que esta pintándose en alguna de las plantas

Procesos

Para modelar los procesos de la planta NMISA, primero se diseñaron todas las rutas de proceso que conectan las diferentes locaciones atendiendo a la descripción que se tiene de la planta. En la figura 5.4 se puede ver la forma en que lucen los procesos en el front end de Promodel en tiempo de diseño.

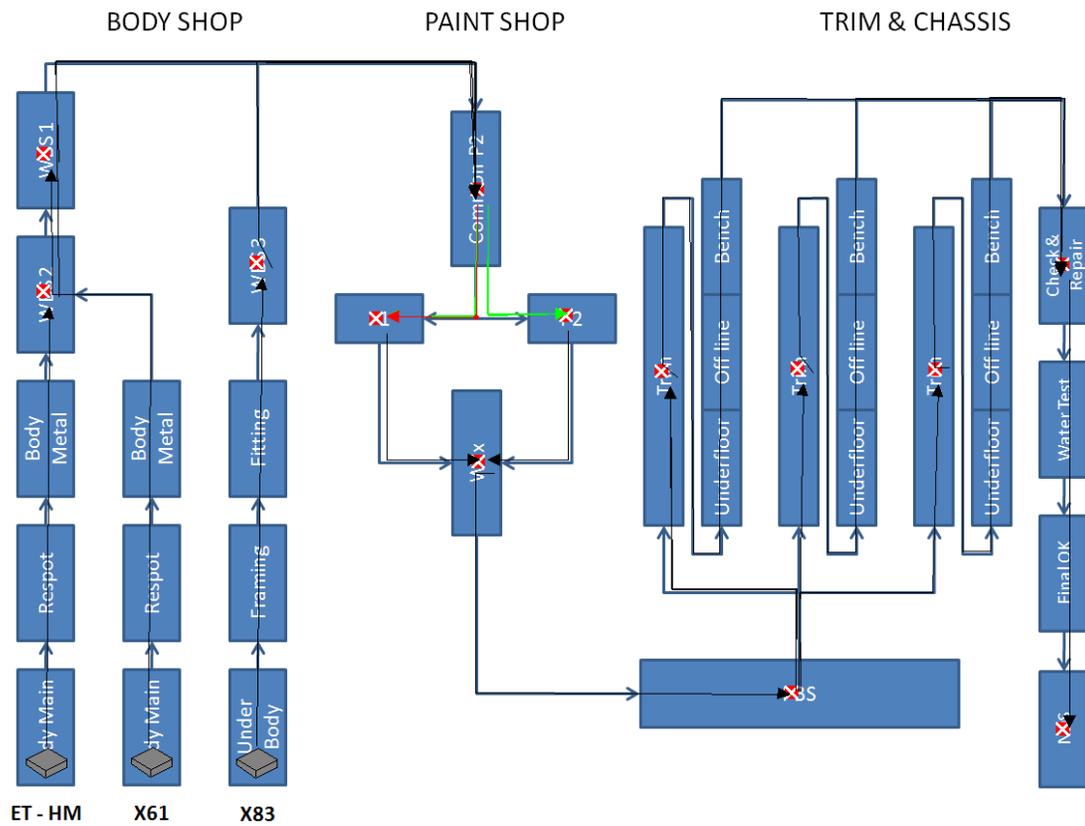


Figura 5.4. Secuencia de procesos del modelo NMISA

En la interfaz de usuario de Promodel, cada proceso se define por la entidad que arriba, la locación a la que llega y la operación que se realiza. En la tabla 5.6 se muestran los procesos del modelo NMISA.

Adicionalmente, cada proceso tiene una tabla asociada que contiene la lógica que seguirán las entidades una vez que se ha efectuado en proceso. La tabla 5.7 es un ejemplo del ruteo de un proceso del modelo desarrollado. Aquí se muestra que para configurar el ruteo hay que declarar la entidad que sale, la locación a la que se dirige, la disciplina con la que se escoge y la lógica de su movimiento. En este caso la disciplina no es fifo o random, se trata de una regla de usuario que verifica el atributo attauto de cada entidad para establecer la locación destino.

Entity...	Location...	Operation...
XX	IniTerranoAlmera	
XX	IniPathFinder	
XX	IniVan	
XX	WBS2	WAIT N(10, 2)
XX	WBS1	WAIT N(10, 2)
XX	WBS3	WAIT N(8, 3)
XX	P0	
XX	P1	IntTipoAuto=AttAutoRecalculaC
XX	P2	IntTipoAuto=AttAuto
XX	Wax	WAIT E(15) MIN
XX	PBS	WAIT E(25) MIN
XX	TrimChassTerraAlmera	WAIT U(460,25) MIN
XX	TrimChassPathFinder	WAIT U(480,20) MIN
XX	TrimChassVan	WAIT U(500,30) MIN
XX	CheckRepair	wait 10 min
XX	NDS	wait 10 min

Tabla 5.6. Procesos usados en el modelo

Blk	Output...	Destination...	Rule...	Move Logic...
1	XX	TrimChassTerraAlmera	IF Att&Auto=1, 1	MOVE FOR 10 MIN
	XX	TrimChassTerraAlmera	IF Att&Auto=2	
	XX	TrimChassPathFinder	IF Att&Auto=3	MOVE FOR 10 MIN
	XX	TrimChassVan	IF Att&Auto=4	MOVE FOR 10 MIN

Tabla 5.7. Ruteo del proceso en pbs

En las tablas 5.6 y 5.7, se puede ver que en el campo “operation” y en el campo “move logic” respectivamente, se puede declarar con código determinada lógica. Esta lógica es ejecutada cada vez que una entidad visita esta locación y nos sirve para programar condiciones particulares. En el caso del modelo NMISA usamos estos lugares para hacer que el modelo sea lo más parecido a la realidad que queremos estudiar. También es aquí donde se programarán las distintas formas de proceder cuando se estudien los casos de asignación de tareas en la planta de pintura. En la figura 5.5 se puede apreciar el campo donde se puede escribir el código y la herramienta de ayuda en la escritura del mismo.

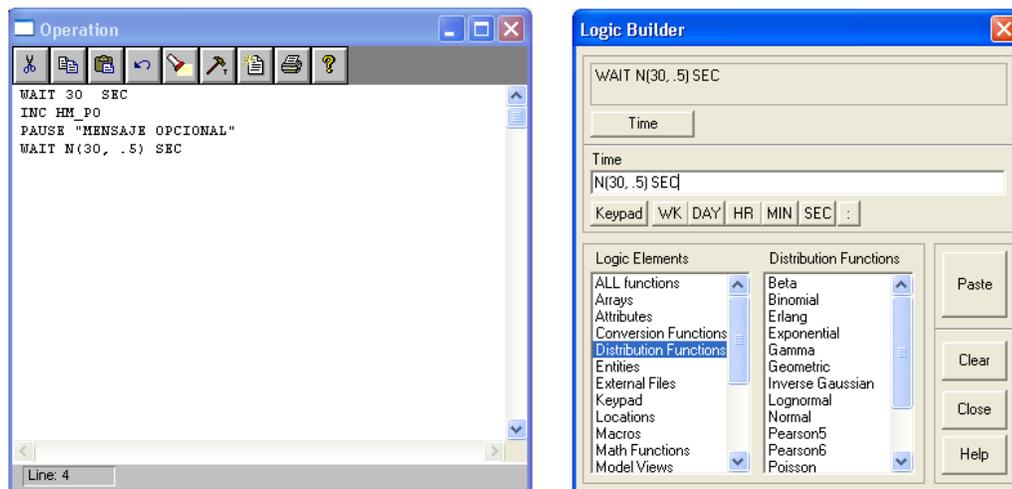


Figura 5.5. Edición del campo “operation” y vista del constructor de código

A continuación se dan cuatro ejemplos sobre el uso del campo “operation” para definir la lógica de funcionamiento de un modelo:

```
wait 30 sec
Inc hm_p0
Pause "hola mundo"
wait e(30) sec
```

La primer línea se usa para hacer que cada entidad que llegue a esa locación espere incondicionalmente 30 segundos del reloj de simulación. La segunda línea simplemente incrementa la variable hm_p0 en uno. La tercer línea hace una pausa en la simulación y despliega un cuadro de diálogo con el mensaje “hola mundo”. La última sentencia también establece un tiempo de espera, pero en lugar de tener un valor determinístico, el tiempo se establece como un valor aleatorio generado por una función de distribución exponencial con media en 30.

A continuación se presenta la lista de las funciones que se han utilizado en este modelo:

- wait a
- N(a,b)
- Trunc(a)
- Rand(a)
- A=b
- A>b
- A<b
- A<=b
- A>=b
- Inc a
- Graphic a
- If {...} Then{...} Else {...}
- Goto a
- A:
- E(a)
- U(a,b)
- Move for a

Arreglos

En esta sección se definen variables multidimensionales (matrices) de m x n de tipo real o entero. Los arreglos en Promodel pueden crearse vacíos y actualizar su valor en tiempo de simulación por medio de índices. También pueden ser generados y llenados al inicio de la simulación por medio de un archivo de ms Excel. La siguiente tabla muestra los tres arreglos usados en el modelo de NMISA.

ID	Dimensions	Type...	Import File...	Export File...	Notes...
MatrizCostos	6, 6	Real	C:\Documents and Settings...		
MzCuenta	6, 6	Integer	C:\Documents and Settings...		
MzCuentaMax	6, 6	Integer	C:\Documents and Settings...		

Tabla 5.8. Arreglos del modelo

El significado de los arreglos es el siguiente:

- Matrizcostos es una matriz simétrica que contiene el costo de cambiar de pintura desde el color i hasta el color j
- Mzcuenta sirve como memoria de autos del modelo i pintados de color j
- Mzcuentamax es la demanda total de autos del modelo i pintados de color j

Tablero de resultados

En el modelo de NMISA se incluye un tablero de resultados con el conteo de autos pintados del modelo i y del color j. En la parte superior están la cantidad demandada de cada modelo y color, mientras que en la parte inferior los números van incrementándose.

Al final de la simulación ambos cuadros muestran los mismos valores y además coinciden con la demanda total de cada modelo y color, es decir, con los arribos totales.

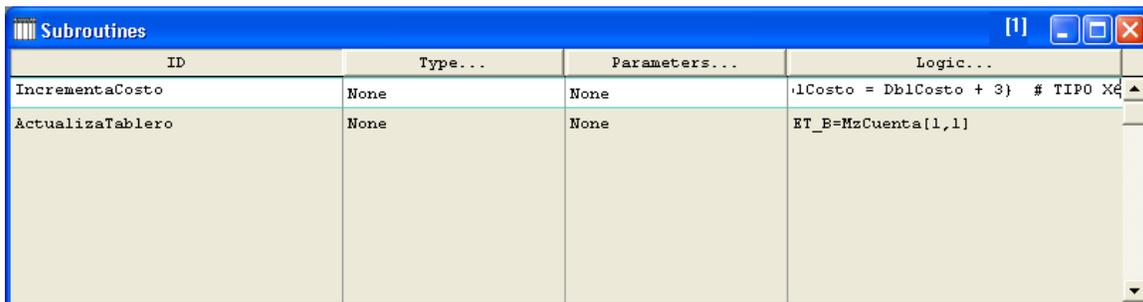
	ET	HM	X61	X83
BLANCO	5	26	45	60
PLATA	8	43	75	100
ROJO	4	22	39	52
AZUL	4	22	39	52
ARENA	2	14	24	32
COCOA	2	10	18	24

	ET	HM	X61	X83
BLANCO	5	7	7	2
PLATA	8	5	3	3
ROJO	4	4	4	5
AZUL	4	5	6	5
ARENA	2	9	3	4
COCOA	2	7	10	6

Figura 5.6. Tablero de resultados

Subrutinas

Como regla general, si en un programa es necesario usar varias veces un mismo trozo de código, y además es llamado desde varias partes del programa, es recomendable encapsular esta lógica. En Promodel existen repositorios de código llamados subrutinas que tienen esta función. En la tabla 5.9 se pueden apreciar dos subrutinas hechas para el modelo NMISA.



ID	Type...	Parameters...	Logic...
IncrementaCosto	None	None	.lCosto = DblCosto + 3} # TIPO X6
ActualizaTablero	None	None	ET_B=MzCuenta[1,1]

Tabla 5.9. Subrutinas del modelo

La subrutina incrementacosto es llamada cada vez que se realiza la operación de pintura y está encargada de incrementar el costo global de la operación de la planta por dos conceptos: modelo pintado y cambio de color de pintura (por concepto de limpieza del sistema de pintura). A continuación se muestra el código de esta subrutina:

```
If intcolorprevio=0 then {intcolorprevio=intcolor}
Dblcosto = dblcosto + matrizcostos[intcolor-1,intcolorprevio-1]
If inttipoauto= 1 then {dblcosto = dblcosto + 2} # tipo et
If inttipoauto= 2 then {dblcosto = dblcosto + 1} # tipo hm
If inttipoauto= 3 then {dblcosto = dblcosto + 2} # tipo x6
If inttipoauto= 4 then {dblcosto = dblcosto + 3} # tipo x6
```

La subrutina actualizatablero es llamada cada vez que una unidad pasa por el último proceso y solo sirve para incrementar cada modelo y color de auto pintado en el tablero de resultados.

A continuación se muestra el código de esta subrutina:

```
Et_b=mzcuenta[1,1]
Hm_b=mzcuenta[1,2]
X6_b=mzcuenta[1,3]
X8_b=mzcuenta[1,4]
Et_p=mzcuenta[2,1]
Hm_p=mzcuenta[2,2]
X6_p=mzcuenta[2,3]
X8_p=mzcuenta[2,4]
Et_r=mzcuenta[3,1]
Hm_r=mzcuenta[3,2]
X6_r=mzcuenta[3,3]
X8_r=mzcuenta[3,4]
Et_z=mzcuenta[4,1]
Hm_z=mzcuenta[4,2]
X6_z=mzcuenta[4,3]
X8_z=mzcuenta[4,4]
Et_a=mzcuenta[5,1]
Hm_a=mzcuenta[5,2]
X6_a=mzcuenta[5,3]
X8_a=mzcuenta[5,4]
Et_c=mzcuenta[6,1]
Hm_c=mzcuenta[6,2]
X6_c=mzcuenta[6,3]
X8_c=mzcuenta[6,4]
```

5.2 Criterios de desempeño

Costo total

Como se menciona en la sección de variables globales, dblcosto es una variable real que se va incrementando según se van pintando modelos distintos de auto y también se va incrementando según los cambios de color de cada unidad. Como es una variable que inicia en cero y se va actualizando durante todo el periodo de la simulación, nos va a servir como un primer criterio de comparación en la asignación de tareas de pintura. La figura 5.7 muestra la evolución de la variable global dblcosto en el tiempo de simulación.

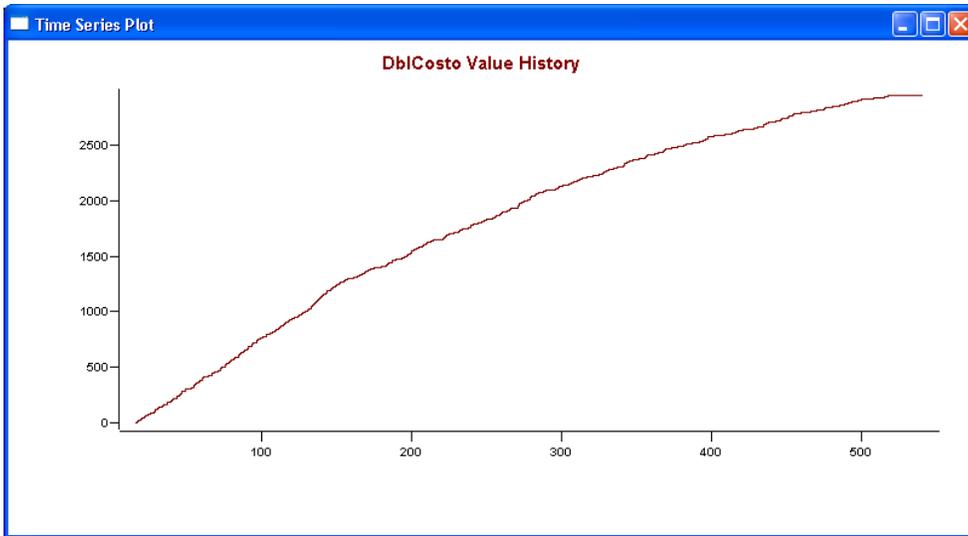


Figura 5.7. Evolución de la variable dblcosto

Actividad de entidades

Usando el reporte general del módulo de salida de Promodel, se puede analizar la actividad de las entidades. Las mediciones más importantes son las de "tiempo promedio en el sistema" y la de "promedio de minutos bloqueado". En la figura 5.8 se pueden apreciar estas dos mediciones.

The screenshot shows a window titled "ProModel Output - [General Report]" with a menu bar (File, View, Options, Window, Help) and a toolbar. The main content area displays two tables:

ENTITY ACTIVITY

Entity Name	Total Exits	Current Quantity In System	Average Minutes In System	Average Minutes In Move Logic	Average Minutes Wait For Res, etc.	Average Minutes In Operation	Average Minutes Blocked
XX	722	0	2031.36	1384.58	0.00	552.83	93.93

ENTITY STATES BY PERCENTAGE

Entity Name	% In Move Logic	% Wait For Res, etc.	% In Operation	% Blocked
XX	68.16	0.00	27.22	4.62

The bottom right corner of the window shows the text "Modified".

Figura 5.8. Estado de las entidades

5.3 Implementación

En el capítulo dos se presentaron ocho reglas básicas de asignación de tareas. Sin embargo, por las características del modelo planteado las ocho reglas se pueden reducir a cuatro. En la siguiente tabla se muestran dichas reglas, un comentario sobre su reducción y la regla a la que se reducen.

Regla	Descripción	Comentario	Se reduce a
1. FCFS	<i>First-come, first-served.</i> (primero en entrar, primero en trabajarse). Los pedidos se ejecutan en el orden en que llegan al departamento	<i>Se implementa</i>	FCFS
2. SOT	<i>Shortest operating time.</i> (tiempo de operación más breve). Ejecutar primero el trabajo con el tiempo de terminación más breve, luego el siguiente más breve, etc. Se llama también SPT (<i>shortest processing time</i> , tiempo de procesamiento más breve)	<i>Se implementa</i>	SOT
3. EDD	<i>Earliest due date first.</i> (primero el plazo más próximo) se ejecuta primero el trabajo que antes se venza	Todos los trabajos vencen al mismo tiempo	FCFS
4. STR	<i>Slack time remaining.</i> (tiempo ocioso restante). Se calcula como el tiempo que queda antes de que se venza el plazo menos el tiempo restante de procesamiento. Los pedidos con menor tiempo ocioso restante (STR) se ejecutan primero	Todos los trabajos vencen al mismo tiempo	FCFS
5. STR/OP	<i>Slack time remaining per operation.</i> (tiempo ocioso restante por operación). Se ejecutan primero los pedidos con el menor tiempo ocioso por números de operaciones. $STR/OP = STR/número \text{ de operaciones restantes}$	Todos los trabajos vencen igual y restan mismo número de operaciones	FCFS
6. CR	<i>Critical rate.</i> (<i>proporción crítica</i>). Se calcula como la diferencia entre la fecha de vencimiento y la fecha actual, dividida entre el número de días hábiles que quedan. Se ejecutan primero los pedidos con la menor CR	Todos los trabajos vencen al mismo tiempo	FCFS
7. LCFS	<i>Last-come, first-served.</i> (último en llegar, primero en trabajarse). Esta regla se aplica a menudo automáticamente. Cuando llegan los pedidos, de ordinario se colocan arriba de la pila; el operador toma primero el que esté más alto	<i>Se implementa</i>	LCFS
8. Aleatorio	Orden aleatorio o capricho. Los supervisores u operadores escogen el trabajo que quieran ejecutar	<i>Se implementa</i>	Aleatorio

Tabla 5.10. Reducción de reglas de asignación

Básicamente esta situación se dio debido a que en la última fase de la producción todos los autos se deben entregar en el mismo plazo. Además, el número de operaciones que siguen a la operación de pintura es el mismo para todos los modelos y los tiempos de ejecución son muy parecidos.

Cada una de las cuatro reglas simplificadas requiere un uso especial del modelo básico planteado en este capítulo. Las particularidades son:

- Regla 1. FCFS Para modelar esta disciplina se va usar una locación tipo línea de espera (queue) entre la locación común de pintura y cada una de las plantas p1 y p2. Es propiedad de Promodel el acumular y asignar esta disciplina en una línea de espera
- Regla 2. SOT. Para modelar esta disciplina, en los arribos se va a considerar el hacer el mínimo cambio de color entre todos los modelos
- Regla 7. LCFS Para modelar esta disciplina se va usar una locación tipo línea de espera (queue) entre la locación común de pintura y cada una de las plantas p1 y p2. Es propiedad de Promodel el acumular y asignar esta disciplina en una línea de espera
- Regla 8. Aleatorio. Para modelar esta disciplina en los arribos se va a asignar un color de pintura en forma aleatoria

En el siguiente apartado se presentarán los resultados de la ejecución del modelo bajo los últimos cuatro supuestos.

Resultados

Durante la ejecución de un modelo de simulación el programa Promodel, aparte de actualizar la animación, guarda valores numéricos relacionados con variables, locaciones y entidades. En el caso de las variables, es posible construir una gráfica que muestre la evolución de la variable con respecto del tiempo. Para las locaciones se pueden mostrar valores como capacidad, contenido promedio, contenido máximo, porcentaje de utilización, porcentaje vacía, porcentaje ocupada, etc. Orientados a analizar la capacidad de la locación con respecto de su utilización. Hablando de las entidades, se pueden consultar valores como porcentaje del tiempo en que una entidad se encuentra en procesamiento, en movimiento, bloqueada, o en espera, de tal modo que se pueda analizar qué proceso representa un cuello de botella o donde hay que hacer cambios de capacidad o lógica de asignación.

Como se mencionó en el capítulo anterior, las ocho reglas de secuencia de tareas se redujeron a cuatro aplicables al modelo de NMISA que se construyó. Con el fin de poder comparar el desempeño de cada una, se usó el reporte general de salida de Promodel. El listado completo de los resultados se puede consultar en el apéndice de este trabajo.

Análisis de la variable costo

Como se mencionó anteriormente, el modelo construido incluye una variable que testifica el incremento del costo de pintar un auto. Este incremento se debe a dos factores:

1. El área del modelo pintado
2. El color anterior que se ha pintado

Las siguientes figuras son las gráficas de la evolución de la variable costo bajo las cuatro reglas de asignación estudiadas. En el eje vertical se encuentra la representación del valor del costo, mientras que en el eje horizontal se encuentra el tiempo en horas.

Para las reglas FCFS (primero en llegar, primero en ejecutar) y LCFS (último en llegar, primero en ejecutar), los resultados son muy parecidos. El costo se incrementa describiendo una curva muy parecida y llegan respectivamente a valores 14,572 y 14,812. El valor más grande, 22,588, es alcanzado bajo la regla aleatoria. El mejor resultado, 6,724 es el alcanzado por la regla SOT (Tiempo de operación más corto). En la gráfica se puede observar que la evolución de la variable se incrementa en pasos relacionados con los cambios ordenados de color y modelo.

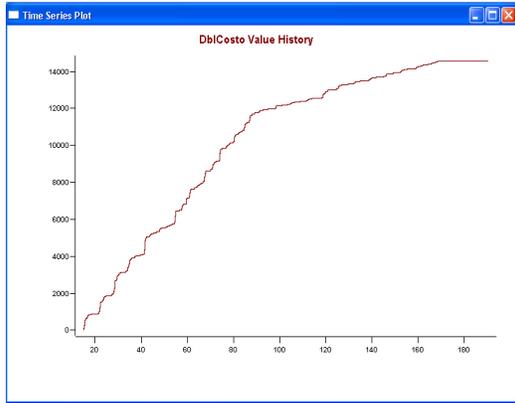


Figura 6.1. Evolución de la variable costo bajo la regla FCFS

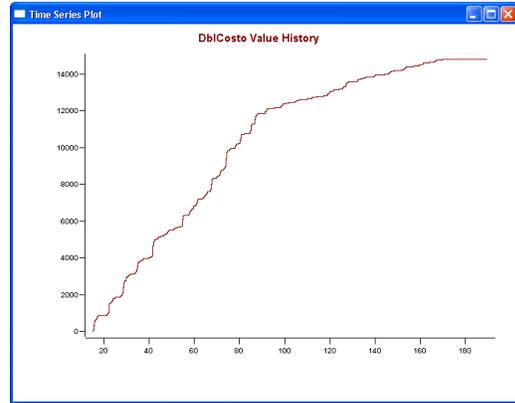


Figura 6.2. Evolución de la variable costo bajo la regla LCFS

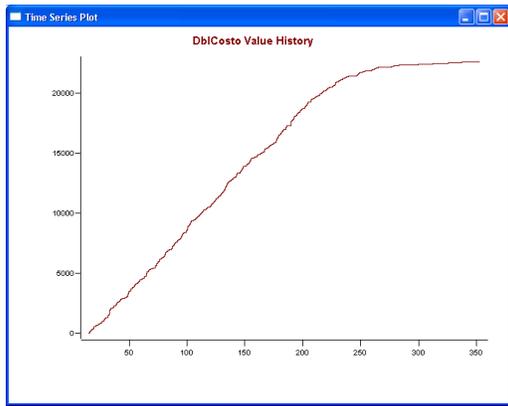


Figura 6.3. Evolución de la variable costo bajo la regla aleatoria

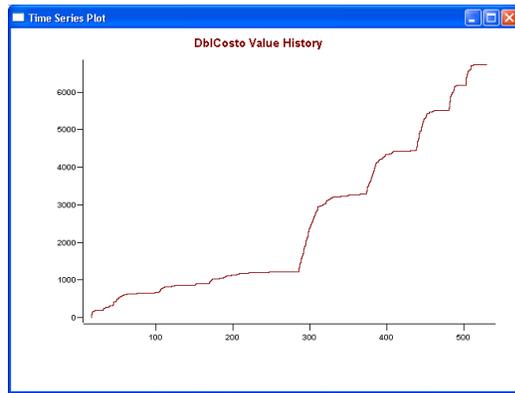


Figura 6.4. Evolución de la variable costo bajo la regla SOT

Aplicación de la regla SOT distribuido

La siguiente es una tabla comparativa entre las cuatro reglas, donde se pueden observar algunas métricas importantes. Los cuadros verdes representan el mejor valor, mientras que los cuadros rojos muestran el peor valor.

	TIEMPO SIMULADO	COSTO TOTAL	TIEMPO PROMEDIO EN EL SISTEMA	PROMEDIO DE MINUTOS BLOQUEADO	% EN MOVIMIENTO	% EN OPERACION	% BLOQUEADO
1. FCFS	190.57	14,572	4,817.28	2,829.98	29.69%	11.53%	58.75%
2. SOT	531.32	6,724	20,461.01	16,644.60	15.91%	2.74%	81.35%
7. LCFS	189.87	14,812	4,814.34	2,831.85	29.61%	11.56%	58.82%
8. ALEATORIO	352.96	22,588	8,054.68	5,278.98	27.58%	6.89%	65.54%

Tabla 6.1. Comparativo entre las cuatro reglas

Como es de esperarse, la mejor regla en un aspecto no es siempre la mejor en forma global. Un administrador que estuviera interesado en disminuir costos, sabría que para obtener una mejora en costo cercana a la mitad, tendría que incrementar el tiempo promedio en el sistema a casi el cuádruple, por lo que probablemente otros costos que no analizamos en el modelo se dispararían, además de que seguramente provocaría retrasos en toda la cadena de suministro.

Evidentemente, lo que hace muy lento al modelo SOT es el reacomodo de colores en p0, por lo que si pudiésemos ir adelantando este intercambio de colores desde las primeras fases de la producción, probablemente podríamos ayudar a que los tiempos disminuyan sin sacrificar el costo. Lo anterior implica usar capacidad de los almacenes wbs para dejar pasar ciertos colores y retener otros según vayan llegando. Específicamente en el modelo de Promodel, esto implica alterar la forma en que cada entidad es procesada en los almacenes wbs. Hay que usar la información del color que se está pintando para ir dando prioridad a ese color mientras que se retienen los otros. Como en esta propuesta se va a distribuir a los almacenes wbs la tarea de reacomodar los colores, este modelo se llamará SOT distribuido.

Los siguientes son los resultados con la regla SOT distribuido.

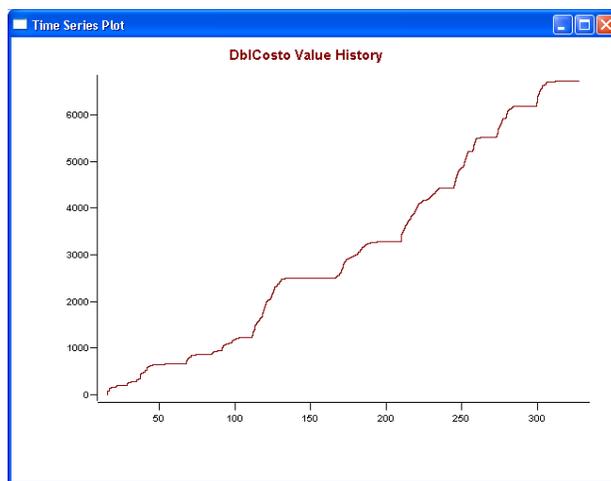


Figura 6.5. Evolución de la variable costo bajo la regla SOT distribuido

	TIEMPO SIMULADO	COSTO TOTAL	TIEMPO PROMEDIO EN EL SISTEMA	PROMEDIO DE MINUTOS BLOQUEADO	% EN MOVIMIENTO	% EN OPERACION	% BLOQUEADO
1. FCFS	190.57	14,572	4,817.28	2,829.98	29.69%	11.53%	58.75%
2. SOT	531.32	6,724	20,461.01	16,644.60	15.91%	2.74%	81.35%
7. LCFS	189.87	14,812	4,814.34	2,831.85	29.61%	11.56%	58.82%
8. ALEATORIO	352.96	22,588	8,054.68	5,278.98	27.58%	6.89%	65.54%
SOT DISTRIBUIDO	294.43	6,724	10,686.56	8,104.27	18.48%	5.69%	75.84%

Tabla 6.2. Comparativo entre las cinco reglas

Conclusiones

Con la rápida evolución del software especializado en simulación, actualmente es más difícil decidir si un problema es susceptible de ser analizado con simulación y conseguir datos del modelo, que construir un modelo básico sobre el cual comenzar a trabajar. Es por eso que, como guía general se recomienda analizar la complejidad y la variabilidad del sistema para decidir si usar o no simulación. Siempre que se tenga que tomar una decisión operativa, que pese más que otros aspectos y que el proceso esté bien definido aunque sea complejo y con variables aleatorias, no es descartable el uso de la simulación. Si además el costo de usar la simulación es menor que el impacto de las decisiones que se van a tomar, la simulación se perfila como un buen candidato para analizar el problema a tratar.

Como ejemplos del uso de la simulación en manufactura están la planeación de flujo de trabajo, planeación de la capacidad, reducción del tiempo de ciclo, planeación de recursos, análisis de cuellos de botella, inventarios, balanceo de líneas, agenda de mantenimiento y diseño de sistemas de control.

En el caso específico de este trabajo, se tomó la asignación de tareas de pintura de la planta NMISA porque es un ejemplo de manufactura donde hay cierta libertad para asignar la fase final de la tarea de pintura. La planta NMISA como muchas de la industria automotriz tiene sistemas que integran la demanda desde un plan estratégico, hasta la producción de un turno específico, pasando por el plan agregado de ventas y operaciones, el plan de operaciones, el programa maestro, la planeación de requerimientos y el programa de pedidos.

Además de esto, la forma en que se integran los pedidos obedece a la forma en que se mueve el mercado, la forma en que se pronosticaron las ventas, la forma en que se distribuyen los productos y la forma en que se integran los insumos, que en conjunto dan lugar a que la lista de modelos y colores de auto que se han de fabricar en un cierto periodo de tiempo se mueva continuamente y que no sea posible aplicar un algoritmo de optimización para producir siempre en el punto óptimo, y que además quede a criterio de los encargados de la planta el decidir que colores y modelos se pintan.

Se ha elegido la planta de pintura para explorar reglas de asignación de tareas porque es la planta más complicada y porque los otros procesos están un un nivel mucho mayor de automatización. En la planta de pintura se tiene la oportunidad de optimizar recursos simplemente alterando el orden en que se pintan los autos.

Las reglas que se analizaron fueron las ocho siguientes:

- Primero en entrar, primero en trabajarse, FCFS
- Tiempo de operación más breve, SOT
- Primero el plazo más próximo, EDD
- Tiempo ocioso restante, STR
- Tiempo ocioso restante por operación, STR/OP
- Proporción crítica, CR
- Último en llegar, primero en trabajarse, LCFS
- Orden aleatorio

Al ser aplicadas al modelo construido se redujeron a las siguientes cuatro:

- Primero en entrar, primero en trabajarse, FCFS
- Tiempo de operación más breve, SOT
- Último en llegar, primero en trabajarse, LCFS
- Orden aleatorio

Estas cuatro reglas fueron programadas en Promodel como variaciones del modelo básico de NMISA, dando lugar a la tabla 6.1 que muestra los resultados. De esta tabla puede concluirse que la regla SOT es muy eficiente en costo, pero hace muy lento el paso de los autos por la planta de manufactura, por lo que se propuso un modelo SOT distribuido que transfiere el proceso de reordenar la demanda de autos desde la planta de pintura hacia los tres almacenes previos, ganando con esto una significativa reducción del tiempo que pasa un auto en la planta. La tabla 6.1 muestra este resultado. El costo se ha mantenido, mientras que el tiempo promedio en el sistema se ha reducido en un 48%. Lo que significa que la demanda programada se puede cumplir en un 55% del tiempo que tomaba con el modelo SOT simple.

Al construir y ejecutar un modelo de simulación como este, algunas nociones que se intuyen en un principio han sido verificadas. Un ejemplo de esto es que parece lógico que ordenando la demanda por colores, se mejore el costo, pero al ejecutar esto, aparecen los costos de encolar los autos y la solución que parecía la mejor, puede ser la que más problemas con los clientes nos acarree. Otra intuición que fue verificada es que el modelo aleatorio, es sumamente costoso tanto en material como en tiempo, debido a los cambios de color que necesita.

Retomando el planteamiento del modelo hecho por Miquel Angel Piera y Antoni Guash (Guash, 2005), ellos pueden encontrar una permutación óptima para un estado cualquiera del sistema, pero requieren tiempo y recursos de procesamiento fuera de línea para encontrarla.

Con la propuesta de regla SOT distribuido lo que se tiene es una disciplina al momento de decidir que tipo de auto se va a procesar, con lo que se logra mantenerse siempre en los niveles más bajos de costo.

Referencias

1. Guasch Antoni, Piera Miquel Angel, (2005) *Modelado y Simulación. Aplicación a Procesos Logísticos de Fabricación y Servicios*. México, primera edición, Alfaomega Grupo Editor, SA de CV
2. Harrell Charles, Ghosh Biman, (2003) *Simulation Using Promodel*. Estados Unidos, segunda edición, Mc Graw Hill
3. Ríos David, Ríos Sixto (2009) *Simulación Métodos y Aplicaciones*. México, segunda edición, Alfaomega Grupo Editor, SA de CV
4. Chase Richard, Jacobs Robert, (2009) *Administración de Operaciones Producción y Cadena de Suministros*. México, duodécima edición, Mc Graw Hill
5. Piera Miquel Angel , Guasch Antoni (2004) *Constraint Satisfaction in the Automobile Industry: A Coloured Petri Net Simulation Model Approach*
6. Merkurjev Y, Merkurjeva G, Piera, M.A., (2009) *Simulation-Based Case Studies in Logistics*. España, primera edición, Springer
7. Fuentes Zenón Arturo, (2002) *Las Armas del Estratega. La Planeación en Imágenes*
8. Fuentes Zenón Arturo, (2001) *Enfoques de Planeación, un sistema de metodologías. La Planeación en Imágenes*
9. Turban, Leidner, McLean, Wetherbe, (2006) *Information Technology for Management*. USA, quinta edición, WILEY
10. Fitzsimmons, Fitzsimmons, (2006) *Service Management*. USA, quinta edición, Mc Graw Hill
11. Simchi-Levi, Kaminsky. (2003) *Designing & Managing the Supply Chain*. USA, segunda edición, Mc Graw Hill
12. Bonini, Hausman, Bierman, (1997) *Quantitative Analysis for Management*. USA, novena edición, Mc Graw Hill
13. Hillier, Lieberman, (2002) *Investigación de Operaciones*. México, séptima edición, Mc Graw Hill
14. Bonini, Hausman, Bierman, (1997) *Quantitative Analysis for Management*. USA, novena edición, Mc Graw Hill
15. Stock, Lambert, (2001) *Strategic Logistics Management*. USA, cuarta edición, Mc Graw Hill
16. Gaither, Frazier, (2002) *Operations Management*. USA, novena edición, Thomson

17. Render, Heizar, (2004) *Principios de Administración de Operaciones*. México, quinta edición, Pearson Prentice Hall
18. Villarreal Parrás, (2003) *Curso Básico de Entrenamiento Promodel*. México, primera edición, Decisiones Inteligentes, Promodel México
19. ROADEF <http://challenge.roadef.org/2005/en/>
20. Renault Consulting <http://www.renault-consulting.es/>
21. Cátedra Renault <http://www.renault-consulting.es/catedra/>
22. Wikipedia, Nissan <http://en.wikipedia.org/wiki/Nissan>
23. IRMI <http://www.sonoracorp.com/index.php>

Apéndice A. Tablas de resultados

En este apartado se encuentran las tablas que muestran los resultados de la ejecución de los 5 diferentes modelos de asignación de tareas de pintura.

Aplicación de la regla FCFS

 Replication : 1 of 1
 Simulation time : 190.57

Locations

Location Name	scheduled hours	capacity	total entries	Average minutes per entry	average contents	maximum contents	current contents	% util
Initerranoalmera	190.57	600	162	1652.01	23.40	134	0	3.90
Inipathfinder	190.57	400	240	1848.27	38.79	200	0	9.70
Inivan	190.57	400	320	4154.07	116.25	292	0	29.06
wbs1	190.57	20	240	9.91	0.20	14	0	1.04
wbs2	190.57	14	162	10.15	0.14	7	0	1.03
wbs3	190.57	14	320	8.07	0.22	8	0	1.61
P0	1905.77	50	1037	0.00	0	1	0	0.00
P1	190.57	30	519	1.69	0.07	9	0	0.26
P2	190.57	30	203	2.46	0.04	4	0	0.15
wax	190.57	30	722	14.98	0.94	15	0	3.15
Pbs	190.57	100	722	25.80	1.62	14	0	1.63
Trimchassterraalmera	190.57	50	162	460.98	6.53	23	0	13.06
Trimchasspathfinder	190.57	50	240	481.11	10.09	39	0	20.20
Trimchassvan	190.57	50	320	500.10	13.99	26	0	27.99
Checkrepair	190.57	50	722	10.00	0.63	8	0	1.26
Nds	190.57	50	722	10.00	0.63	8	0	1.26
Conveyp2	190.57	120	518	0.33	0.01	2	0	0.01
Conveyp1	190.57	120	519	4.98	0.22	5	0	0.19
Espera	190.57	999999	315	0.00	0	1	0	0.00
Demanda	190.57	999999	722	0.00	0	1	0	0.00

Location states by percentage (multiple capacity)

Location Name	scheduled hours	% empty	% partially occupied	% full	% down
Initerranoalmera	190.57	64.26	35.74	0.00	0.00
Inipathfinder	190.57	62.37	37.63	0.00	0.00
Inivan	190.57	21.35	78.65	0.00	0.00
wbs1	190.57	95.70	4.30	0.00	0.00
wbs2	190.57	94.03	5.97	0.00	0.00
wbs3	190.57	87.54	12.46	0.00	0.00
P0	1905.77	100.00	0.00	0.00	0.00
P1	190.57	97.07	2.93	0.00	0.00
P2	190.57	97.38	2.62	0.00	0.00
wax	190.57	57.46	42.54	0.00	0.00
Pbs	190.57	41.89	58.11	0.00	0.00
Trimchassterraalmera	190.57	58.68	41.32	0.00	0.00
Trimchasspathfinder	190.57	56.79	43.21	0.00	0.00
Trimchassvan	190.57	12.93	87.07	0.00	0.00
Checkrepair	190.57	62.73	37.27	0.00	0.00
Nds	190.57	62.73	37.27	0.00	0.00
Conveyp2	190.57	98.49	1.51	0.00	0.00
Conveyp1	190.57	86.89	13.11	0.00	0.00
Espera	190.57	100.00	0.00	0.00	0.00

Demanda 190.57 100.00 0.00 0.00 | 0.00

Failed arrivals

Entity Name	location name	total failed
xx	demanda	0

Entity activity

Entity Name	total exits	Current quantity in system	Average minutes in system	average minutes in move logic	average minutes wait for res, etc.	average minutes in Operation	average minutes blocked
xx	722	0	4817.28	1430.38	1.49	555.42	2829.98

Entity states by percentage

Entity Name	% in move logic	% wait for res, etc.	% In operation	% blocked
xx	29.69	0.03	11.53	58.75

Variables

Variable Name	total changes	Average minutes per change	minimum value	maximum value	current value	average value
Db1costo	1444	7.20	0	14572	14572	9499.23
Intcolorp1	519	20.04	0	7	6	3.86
Intcolorp2	203	25.85	0	7	7	5.18
Intcolorpreviop1	520	20.00	0	7	6	3.86
Intcolorpreviop2	204	25.73	0	7	7	5.18
Intarribo	722	0.99	1	723	723	700.23

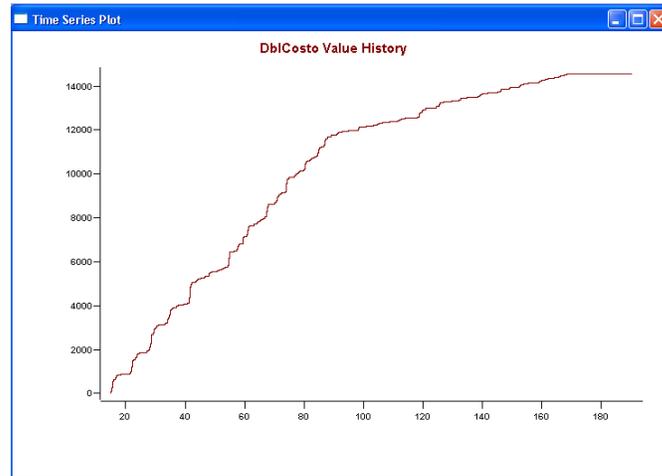


Figura a.1. Evolución de la variable costo bajo la regla FCFS

Aplicación de la regla LCFS

 Replication : 1 of 1
 Simulation time : 189.87

Locations

Location Name	scheduled hours	capacity	total entries	Average minutes per entry	average contents	maximum contents	current contents	% util
Initerranoalmera	189.87	600	162	1651.63	23.48	134	0	3.91
Inipathfinder	189.87	400	240	1848.35	38.93	200	0	9.73
Inivan	189.87	400	320	4159.93	116.84	292	0	29.21
wbs1	189.87	20	240	9.85	0.20	14	0	1.04
wbs2	189.87	14	162	10.24	0.14	7	0	1.04
wbs3	189.87	14	320	8.27	0.23	8	0	1.66
P0	1898.75	50	1027	0.00	0	1	0	0.00
P1	189.87	30	514	1.62	0.07	9	0	0.24
P2	189.87	30	208	2.29	0.04	4	0	0.14
wax	189.87	30	722	14.07	0.89	15	0	2.97
Pbs	189.87	100	722	27.31	1.73	15	0	1.73
Trimchassterraalmera	189.87	50	162	461.45	6.56	23	0	13.12
Trimchasspathfinder	189.87	50	240	479.43	10.1	40	0	20.20
Trimchassvan	189.87	50	320	502.07	14.10	25	0	28.21
Checkrepair	189.87	50	722	10.00	0.63	9	0	1.27
Nds	189.87	50	722	10.00	0.63	9	0	1.27
Conveyp2	189.87	120	513	0.33	0.01	2	0	0.01
Conveyp1	189.87	120	514	3.04	0.13	3	0	0.11
Espera	189.87	999999	305	0.00	0	1	0	0.00
Demanda	189.87	999999	722	0.00	0	1	0	0.00

Location states by percentage (multiple capacity)

Location Name	scheduled hours	% empty	% partially occupied	% full	% down
Initerranoalmera	189.87	64.09	35.91	0.00	0.00
Inipathfinder	189.87	62.28	37.72	0.00	0.00
Inivan	189.87	21.06	78.94	0.00	0.00
wbs1	189.87	95.61	4.39	0.00	0.00
wbs2	189.87	93.77	6.23	0.00	0.00
wbs3	189.87	89.05	10.95	0.00	0.00
P0	1898.75	100.00	0.00	0.00	0.00
P1	189.87	97.14	2.86	0.00	0.00
P2	189.87	97.39	2.61	0.00	0.00
wax	189.87	61.62	38.38	0.00	0.00
Pbs	189.87	41.35	58.65	0.00	0.00
Trimchassterraalmera	189.87	58.25	41.75	0.00	0.00
Trimchasspathfinder	189.87	56.55	43.45	0.00	0.00
Trimchassvan	189.87	13.20	86.80	0.00	0.00
Checkrepair	189.87	62.60	37.40	0.00	0.00
Nds	189.87	62.60	37.40	0.00	0.00
Conveyp2	189.87	98.50	1.50	0.00	0.00
Conveyp1	189.87	90.45	9.55	0.00	0.00
Espera	189.87	100.00	0.00	0.00	0.00
Demanda	189.87	100.00	0.00	0.00	0.00

Failed arrivals

Entity Name	location name	total failed
xx	demanda	0

Entity activity

Entity Name	total exits	Current quantity in system	Average minutes in system	average minutes in move logic	average minutes wait for res, etc.	average minutes in Operation	average minutes blocked
xx	722	0	4814.34	1425.31	0.65	556.51	2831.85

Entity states by percentage

Entity Name	% in move logic	% wait for res, etc.	% In operation	% blocked
xx	29.61	0.01	11.56	58.82

Variables

Variable Name	total changes	Average minutes per change	minimum value	maximum value	current value	average value
Db1costo	1444	7.16	0	14812	14812	9575.93
Intcolorp1	514	20.13	0	7	6	3.78
Intcolorp2	208	25.20	0	7	7	5.19
Intcolorpreviop1	515	20.09	0	7	6	3.78
Intcolorpreviop2	209	25.08	0	7	7	5.19
Intarribo	722	0.99	1	723	723	700.15

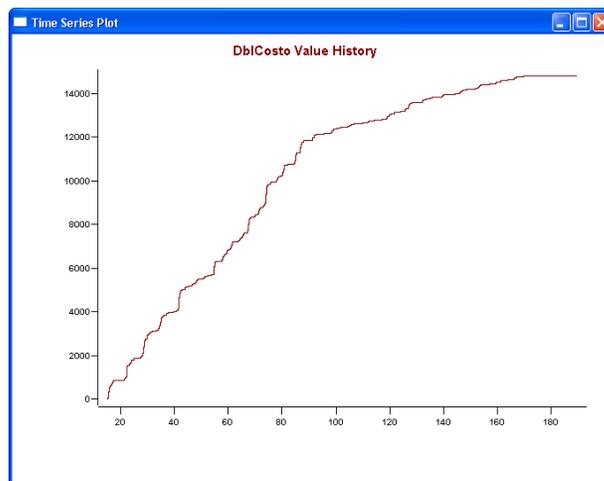


Figura a.2. Evolución de la variable costo bajo la regla LCFS

Aplicación de la regla aleatoria

 Replication : 1 of 1
 Simulation time : 352.96

Locations

Location Name	scheduled hours	capacity	total entries	Average minutes per entry	average contents	maximum contents	current contents	% util
Initerranoalmera	352.96	600	162	2164.19	16.55	134	0	2.76
Inipathfinder	352.96	400	240	2431.12	27.55	200	0	6.89
Inivan	352.96	400	320	5925.96	89.54	292	0	22.39
wbs1	352.96	20	240	187.53	2.12	19	0	10.63
wbs2	352.96	14	162	178.02	1.36	11	0	9.73
wbs3	352.96	14	320	157.61	2.38	14	0	17.01
P0	3529.69	50	6913	0.00	0	1	0	0.00
P1	352.96	30	498	0.00	0	1	0	0.00
P2	352.96	30	224	0.00	0	1	0	0.00
wax	352.96	30	722	13.67	0.46	6	0	1.55
Pbs	352.96	100	722	25.00	0.85	7	0	0.85
Trimchassterraalmera	352.96	50	162	459.82	3.51	13	0	7.03
Trimchasspathfinder	352.96	50	240	480.47	5.44	22	0	10.89
Trimchassvan	352.96	50	320	497.94	7.52	29	0	15.05
Checkrepair	352.96	50	722	10.00	0.34	5	0	0.68
Nds	352.96	50	722	10.00	0.34	5	0	0.68
Conveyp2	352.96	120	3456	0.33	0.05	2	0	0.05
Conveyp1	352.96	120	3457	0.32	0.05	2	0	0.04
Espera	352.96	999999	6191	139.45	40.76	136	0	0.00
Demanda	352.96	999999	722	0.00	0	1	0	0.00

Location states by percentage (multiple capacity)

Location Name	scheduled hours	% empty	% partially occupied	% full	% down
Initerranoalmera	352.96	72.69	27.31	0.00	0.00
Inipathfinder	352.96	70.42	29.58	0.00	0.00
Inivan	352.96	40.99	59.01	0.00	0.00
wbs1	352.96	76.79	23.21	0.00	0.00
wbs2	352.96	77.28	22.72	0.00	0.00
wbs3	352.96	63.30	31.49	5.21	0.00
P0	3529.69	100.00	0.00	0.00	0.00
P1	352.96	100.00	0.00	0.00	0.00
P2	352.96	100.00	0.00	0.00	0.00
wax	352.96	65.38	34.62	0.00	0.00
Pbs	352.96	51.86	48.14	0.00	0.00
Trimchassterraalmera	352.96	42.79	57.21	0.00	0.00
Trimchasspathfinder	352.96	49.25	50.75	0.00	0.00
Trimchassvan	352.96	10.37	89.63	0.00	0.00
Checkrepair	352.96	73.14	26.86	0.00	0.00
Nds	352.96	73.14	26.86	0.00	0.00
Conveyp2	352.96	94.57	5.43	0.00	0.00
Conveyp1	352.96	94.66	5.34	0.00	0.00
Espera	352.96	40.40	59.60	0.00	0.00
Demanda	352.96	100.00	0.00	0.00	0.00

Failed arrivals

Entity Name	location name	total failed
Xx	demanda	0

Entity activity

Entity Name	total exits	Current quantity in system	Average minutes in system	average minutes in move logic	average minutes wait for res, etc.	average minutes in Operation	average minutes blocked
xx	722	0	8054.68	2221.13	0.00	554.56	5278.98

Entity states by percentage

Entity Name	% in move logic	% wait for res, etc.	% In operation	% blocked
xx	27.58	0.00	6.89	65.54

variables

Variable Name	total changes	Average minutes per change	minimum value	maximum value	current value	average value
Db1costo	1444	14.00	0	22588	22588	14294.3
Intcolorp1	498	40.61	0	7	7	3.88
Intcolorp2	224	60.52	0	7	5	4.37
Intcolorpreviop1	499	40.53	0	7	7	3.88
Intcolorpreviop2	225	60.25	0	7	5	4.37
Intarribo	722	0.99	1	723	723	710.71

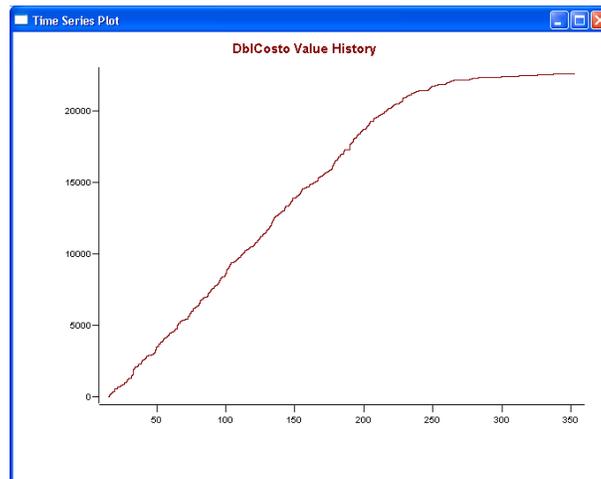


Figura a.3. Evolución de la variable costo bajo la regla aleatoria

Aplicación de la regla SOT

 Replication : 1 of 1
 Simulation time : 531.32

Locations

Location Name	scheduled hours	capacity	total entries	Average minutes per entry	average contents	maximum contents	current contents	% util
Initerranoalmera	531.32	600	162	2664.57	13.54	134	0	2.26
Inipathfinder	531.32	400	240	2976.74	22.41	200	0	5.60
Inivan	531.32	400	320	9000.38	90.34	292	0	22.59
wbs1	531.32	20	240	374.70	2.82	20	0	14.10
wbs2	531.32	14	162	354.23	1.80	14	0	12.86
wbs3	531.32	14	320	569.46	5.71	14	0	40.83
P0	5313.20	50	14449	0.00	0	1	0	0.00
P1	531.32	30	505	0.42	0.00	6	0	0.02
P2	531.32	30	217	0.73	0.00	4	0	0.02
wax	531.32	30	722	15.58	0.35	9	0	1.18
Pbs	531.32	100	722	25.34	0.57	11	0	0.57
Trimchassterraalmera	531.32	50	162	462.10	2.34	23	0	4.70
Trimchasspathfinder	531.32	50	240	479.68	3.61	40	0	7.22
Trimchassvan	531.32	50	320	500.61	5.02	30	0	10.05
Checkrepair	531.32	50	722	10.00	0.22	7	0	0.45
Nds	531.32	50	722	10.00	0.22	7	0	0.45
Conveyp2	531.32	120	7224	0.36	0.08	4	0	0.07
Conveyp1	531.32	120	7225	3.18	0.72	27	0	0.60
Espera	531.32	999999	13727	557.06	239.87	454	0	0.02
Demanda	531.32	999999	722	0.00	0	1	0	0.00

Location states by percentage (multiple capacity)

Location Name	scheduled hours	% empty	% partially occupied	% full	% down
Initerranoalmera	531.32	76.56	23.44	0.00	0.00
Inipathfinder	531.32	74.53	25.47	0.00	0.00
Inivan	531.32	32.79	67.21	0.00	0.00
wbs1	531.32	76.69	18.45	4.86	0.00
wbs2	531.32	76.45	22.03	1.52	0.00
wbs3	531.32	39.40	43.61	16.98	0.00
P0	5313.20	100.00	0.00	0.00	0.00
P1	531.32	99.79	0.21	0.00	0.00
P2	531.32	99.78	0.22	0.00	0.00
wax	531.32	80.84	19.16	0.00	0.00
Pbs	531.32	75.69	24.31	0.00	0.00
Trimchassterraalmera	531.32	73.88	26.12	0.00	0.00
Trimchasspathfinder	531.32	68.67	31.33	0.00	0.00
Trimchassvan	531.32	24.29	75.71	0.00	0.00
Checkrepair	531.32	84.89	15.11	0.00	0.00
Nds	531.32	84.89	15.11	0.00	0.00
Conveyp2	531.32	92.17	7.83	0.00	0.00
Conveyp1	531.32	86.59	13.41	0.00	0.00
Espera	531.32	8.96	91.04	0.00	0.00
Demanda	531.32	100.00	0.00	0.00	0.00

Failed arrivals

Entity Name	location name	total failed
xx	demanda	0

Entity activity

Entity Name	total exits	Current quantity in system	Average minutes in system	average minutes in move logic	average minutes wait for res, etc.	average minutes in Operation	average minutes blocked
xx	722	0	20461.01	3254.95	0.00	561.46	16644.60

Entity states by percentage

Entity Name	% in move logic	% wait for res, etc.	% In operation	% blocked
xx	15.91	0.00	2.74	81.35

Variables

Variable Name	total changes	Average minutes per change	minimum value	maximum value	current value	average value
Db1costo	1444	21.33	0	6724	6724	2474.13
Intcolorp1	505	60.99	0	7	7	3.02
Intcolorp2	217	141.76	0	7	7	3.02
Intcolorpreviop1	506	60.87	0	7	7	3.02
Intcolorpreviop2	218	141.11	0	7	7	3.02
Intarribo	722	0.99	1	723	723	714.83
Intcoloractual	5	5963.14	2	7	7	3.13

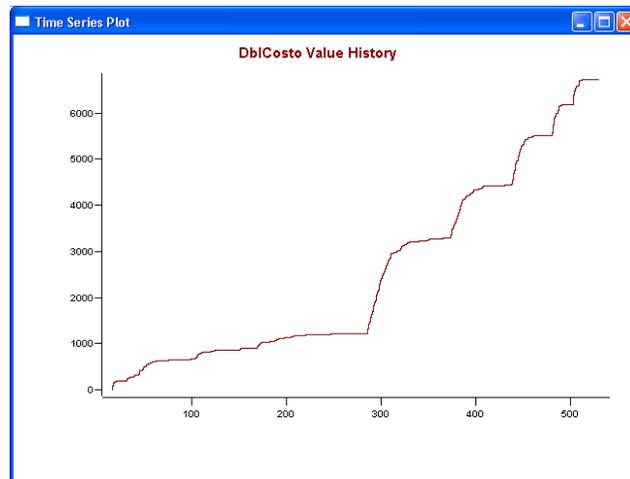


Figura a.4. Evolución de la variable costo bajo la regla SOT

Aplicación de la regla SOT distribuido

 Replication : 1 of 1
 Simulation time : 294.43

Locations

Location Name	scheduled hours	capacity	total entries	Average minutes per entry	average contents	maximum contents	current contents	% util
Initerranoalmera	294.43	600	162	1683.71	15.43	134	0	2.57
Inipathfinder	294.43	400	240	1862.68	25.30	200	0	6.33
Inivan	294.43	400	320	4175.63	75.63	292	0	18.91
wbs1	294.43	20	2232	10.00	1.26	13	0	6.32
wbs2	294.43	14	1518	9.92	0.85	7	0	6.09
wbs3	294.43	14	1145	8.06	0.52	8	0	3.74
P0	2944.32	50	1015	0.00	0	1	0	0.00
P1	294.43	30	508	0.09	0.00	2	0	0.01
P2	294.43	30	214	0.20	0.00	2	0	0.01
wax	294.43	30	722	14.41	0.58	9	0	1.96
Pbs	294.43	100	722	24.62	1.00	12	0	1.01
Trimchassterraalmera	294.43	50	162	459.48	4.21	29	0	8.43
Trimchasspathfinder	294.43	50	240	480.13	6.52	34	0	13.05
Trimchassvan	294.43	50	320	498.50	9.02	38	0	18.06
Checkrepair	294.43	50	722	10.00	0.40	7	0	0.82
Nds	294.43	50	722	10.00	0.40	7	0	0.82
Conveyp2	294.43	120	507	0.33	0.00	1	0	0.01
Conveyp1	294.43	120	508	37.31	1.07	20	0	0.89
Espera	294.43	999999	293	0.00	0	1	0	0.00
Demanda	294.43	999999	722	0.00	0	1	0	0.00
Esperawbs2	294.43	999999	1356	648.84	49.80	118	0	0.00
Esperawbs1	294.43	999999	1992	675.95	76.21	176	0	0.01
Esperawbs3	294.43	999999	825	1878.87	87.74	213	0	0.01

Location states by percentage (multiple capacity)

Location Name	scheduled hours	% empty	% partially occupied	% full	% down
Initerranoalmera	294.43	76.41	23.59	0.00	0.00
Inipathfinder	294.43	75.17	24.83	0.00	0.00
Inivan	294.43	48.48	51.52	0.00	0.00
wbs1	294.43	41.86	58.14	0.00	0.00
wbs2	294.43	48.92	51.08	0.00	0.00
wbs3	294.43	67.56	32.44	0.00	0.00
P0	2944.32	100.00	0.00	0.00	0.00
P1	294.43	99.80	0.20	0.00	0.00
P2	294.43	99.84	0.16	0.00	0.00
wax	294.43	72.31	27.69	0.00	0.00
Pbs	294.43	62.84	37.16	0.00	0.00
Trimchassterraalmera	294.43	55.97	44.03	0.00	0.00
Trimchasspathfinder	294.43	49.41	50.59	0.00	0.00
Trimchassvan	294.43	29.32	70.68	0.00	0.00
Checkrepair	294.43	74.20	25.80	0.00	0.00
Nds	294.43	74.20	25.80	0.00	0.00
Conveyp2	294.43	99.04	0.96	0.00	0.00
Conveyp1	294.43	85.13	14.87	0.00	0.00
Espera	294.43	100.00	0.00	0.00	0.00
Demanda	294.43	100.00	0.00	0.00	0.00
Esperawbs2	294.43	19.59	80.41	0.00	0.00
Esperawbs1	294.43	19.41	80.59	0.00	0.00
Esperawbs3	294.43	13.68	86.32	0.00	0.00

Failed arrivals

Entity Name	location name	total failed
xx	demanda	0

Entity activity

Entity Name	total exits	Current quantity in system	Average minutes in system	average minutes in move logic	average minutes wait for res, etc.	average minutes in Operation	average minutes blocked
xx	722	0	10686.56	1974.55	0.00	607.73	8104.27

Entity states by percentage

Entity Name	% in move logic	% wait for res, etc.	% In operation	% blocked
xx	18.48	0.00	5.69	75.84

Variables

Variable Name	total changes	Average minutes per change	minimum value	maximum value	current value	average value
Db1costo	1444	11.51	0	6724	6724	2809.22
Intcolorp1	508	32.74	0	7	7	3.34
Intcolorp2	214	76.76	0	7	7	3.34
Intcolorpreviop1	509	32.67	0	7	7	3.34
Intcolorpreviop2	215	76.40	0	7	7	3.34
Intarribo	722	0.99	1	723	723	708.26
Intcoloractual	5	3121.36	2	7	7	3.60

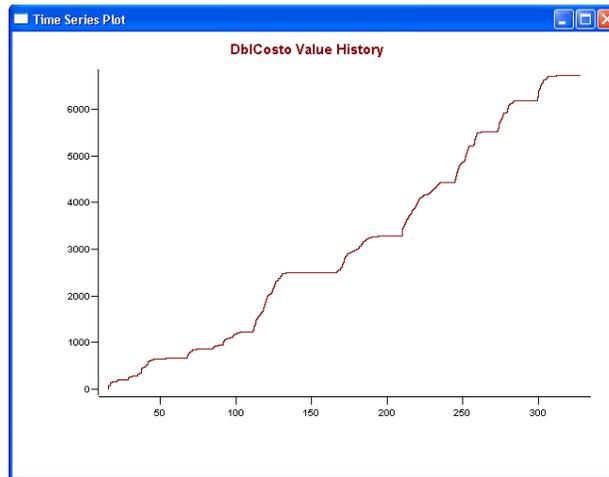


Figura a.5. Evolución de la variable costo bajo la regla SOT distribuido