



TÉCNICAS ESTADÍSTICAS EN MANUFACTURING INTELLIGENCE

**UNIVERSIDAD DE SEVILLA
FACULTAD DE MATEMÁTICAS
GRADO EN ESTADÍSTICA**

RESUMEN

El término “manufacturing intelligence” corresponde a un área de investigación que tiene como objetivo aprovechar las posibilidades que brindan las TIC en los procesos de mejora de la producción en las industrias manufactureras. El principal objetivo es aprovechar el valor de los datos obtenidos de diversas fuentes (y en especial de las propias máquinas), para transformarlos en información útil que proporcione conocimiento apropiado para la mejora de las operaciones en particular y para la gestión de la organización en general.

En la industria es común realizar experimentos para optimizar los procesos de producción. Sin embargo, se requieren numerosos recursos económicos y demasiado tiempo para desarrollarlos. El enfoque elegido en este trabajo es emplear las técnicas de simulación no sólo para disminuir costos y tiempo en la optimización de procesos, sino también para aprovechar las posibilidades que brinda la simulación en el manejo de problemas no tratables mediante programación lineal entera. Es por esto que se ha optado por la simulación como herramienta de soporte al estudio de la secuenciación de trabajos dentro de una configuración de producción del tipo Job Shop.

Este trabajo se ha desarrollado en dos fases. En la primera se ha abordado la identificación y definición de la industria manufacturera. Se estudiaron los componentes de un sistema de manufactura teniendo en cuenta los procesos, estructura, reglas de secuenciación y propuestas de implementación.

En la segunda etapa se ha propuesto un ejemplo de aplicación desarrollado en R dentro de una industria manufacturera dedicada a la fabricación de cajas de cartón. Para ello se ha llevado a cabo un estudio descriptivo y empleado la simulación como herramienta útil para crear escenarios y poder evaluarlos. Esto nos ha permitido identificar distintas posibilidades de mejora.

En el estudio realizado se ha buscado una relación o interacción entre las variables de entrada: tiempos de fabricación planificados, tiempos de fabricación reales, número de colores, tipos de procesos empleados o maquina destinada en la fabricación de los pedidos. El objetivo no ha sido otro que encontrar secuenciaciones de trabajos idóneas que permitan reducir el tiempo de retardo de los pedidos, el tiempo de proceso (Makespan) y aumentar el tiempo de utilización de las máquinas, disminuyendo el tiempo de ocio (idle) en ambientes Job Shop.

STATISTICAL TECHNIQUES IN MANUFACTURING INTELLIGENCE

ABSTRACT

"Manufacturing intelligence" is a term linked to a research area focused on taking advantage of improvement in the production process of manufacturing industries due to ICT development.

The main goal is to take advantage of the value of the data obtained from various sources, specially ICT, in order to transform this data to useful information that generate practical knowledge to improve operational systems as well as management.

In an industrial context, it is common to optimize production processes from previous experiments. However, it is needed to invest a lot of time and resources.

The point of view selected for this academic task is using simulation techniques not only to reduce costs and time to process optimization but taking advantage of the opportunities offered by the simulation in management of untreatable problems via 'Integer linear programming'. This is the main reason to bet for simulation as a support tool for improve scheduling in a Job Shop environment.

This academic task has had two different phases. First, manufacturing industries identification and definition. How? Analyzing the different components of a manufacturing system attending to process, structure, sequencing rules and implementation proposals.

Second, a 'R-application' has been developed for an industry of manufacturing corrugated cardboard boxes. The application is useful for the description of the industry situation and to perform simulations that help to identify options for the process improvement.

In this research, it has been very important to find a link or interaction between input variables: planned production schedules, manufacturing times, number of colors, types of processes used, equipment for manufacturing. The commitment was to find the best operational sequence in order to reduce manufacturing timing, operational

timing (Makespan) and increasing the period of time while using equipments, cutting down non-profitable working time (idle) in Job Shop contexts.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN A LA INDUSTRIA MANUFACTURERA.	
1.1. Definición y ubicación de la industria manufacturera	8
1.2. Contexto	9
1.3. Software de aplicación. Herramientas en red para el manejo de datos	11
1.4. Niveles de una empresa. Estructura normalizada. Indicadores.....	14
1.5. Almacenamiento de la información (IMS)	17
1.6. Herramientas para modelizar (VSM)	18
1.7. Componentes del modelo de industria	20
1.8. Modelo de producción	21
1.9. Tipos de sistemas de control de manufactura	22
1.9.1. Sistemas de control a eventos discretos (DES)	23
1.9.2. Sistemas de control de manufactura basado en agentes	23
1.9.3. Sistemas de control basado en sistemas holónicos	24
1.10. Representación de un modelo genérico	26
1.11. Procesos de fabricación	27
1.12. Estructura de los procesos	28
1.12.1. Flow Shop	28
1.12.2. Job Shop	28
1.12.3. Open Job Shop	28
1.13. Formulación general de los problemas Scheduling	29
1.14. Reglas de secuenciación	32
1.15. Job Shop Scheduling. Definición del problema Job Shop	32
1.16. Propuestas de implementación	36
1.16.1. Métodos exactos. Métodos matemáticos	36
1.16.2. Métodos aproximados. Métodos mixtos	37
1.17. Simulación	38
1.18. ¿Qué se ha hecho hasta el momento?	40

2. EJEMPLO DE APLICACIÓN. INDUSTRIA DE CAJAS DE CARTÓN.	
2.1. Introducción	41
2.2. Etapas del proceso de fabricación	42
2.2.1. Fabricación de planchas de cartón	43
2.2.2. Converting	45
2.3. Mapa de flujo. VSM	47
2.4. Propuestas para la mejora de la eficiencia en las fases de producción	47
2.5. Tratamiento de datos. Entorno R. Etapas del proceso de simulación	49
2.5.1. Análisis descriptivo	51
2.5.2. Simulación simple en la muestra original	66
2.5.3. Retardos producidos al ordenar los pedidos por máquinas	69
2.5.4. Simulación múltiple en una muestra reducida	70
2.5.5. Análisis de resultados	73
3. CONCLUSIONES	74
4. ANEXOS R	76
4.1. Anexo 1: VSM	76
4.2. Anexo 2: Análisis descriptivo	77
4.3. Anexo 3: Análisis de los datos	82
5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	100

1. INTRODUCCIÓN A LA INDUSTRIA MANUFACTURERA.

1. 1 Definición y ubicación de la industria manufacturera.

Podemos entender como industria manufacturera a todas aquellas actividades orientadas a la transformación de los bienes naturales y/o semiprocesados (materia prima) en productos acabados. Esta conversión puede realizarse de forma mecánica, física o química, teniendo en cuenta que el resultado puede derivar en bienes de consumo final o bienes de producción, por lo que también pueden verse involucrados en este sector procesos de elaboración de productos semimanufacturados o semielaborados. Al montaje de componentes de los productos manufacturados también se le considera una actividad de la industria manufacturera.

El término manufactura puede referirse a una variedad enorme de la actividad humana, desde la artesanía a la alta tecnología, pero suele aplicarse generalmente a la producción industrial, allí donde las materias primas se transforman en bienes acabados a gran escala.

Como dato importante, hay que destacar que la manufactura es la actividad clave del sector secundario de la economía, también denominado sector industrial, porque es justamente la que transforma toda la materia prima que se genera en el sector primario.

Dentro de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) a dos dígitos, se consideran 9 grupos de actividad de las industrias manufactureras:

- I. Productos alimenticios, bebidas y tabaco.
- II. Textiles, prendas de vestir e industrias del cuero.
- III. Industrias de la madera y productos de la madera incluidos muebles.
- IV. Fabricación de papel y productos de papel, imprentas, editoriales e industrias conexas.
- V. Fabricación de sustancias químicas y de productos químicos y derivados del petróleo y del carbón, de caucho y plásticos.

- VI. Fabricación de productos minerales no metálicos, excepto los derivados del petróleo y carbón.
- VII. Industrias metálicas básicas e industrias básicas de metales no ferrosos.
- VIII. Fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipo.
- IX. Otras industrias manufactureras, fabricación de joyas y artículos conexos.

1. 2 Contexto.

Aunque la producción artesanal ha formado parte de la humanidad desde hace mucho tiempo (destacando su influencia en la Edad Media), se piensa que la manufactura moderna surge alrededor de 1780 con la Revolución industrial británica, expandiéndose a partir de entonces por toda Europa Continental, América del Norte y finalmente el resto del mundo. Hoy supone una gran porción de la economía de la sociedad contemporánea.

La industria manufacturera en España representa un 79,5%¹ del total del sector industrial. En Andalucía esta cifra de negocio se sitúa como la segunda mayor del país, con un 12,5% del total nacional. Actualmente podemos asegurar que es uno de los sectores más dinámicos de la economía mundial y en el que se está viviendo una auténtica transformación como consecuencia de la aparición y creciente importancia de los países emergentes.

Las empresas manufactureras occidentales se enfrentan al reto de mantenerse competitivas en un entorno muy distinto al de hace sólo 15 años: actualmente entran en juego otros factores como los mercados globalizados, los continuos procesos de consolidación en todos los subsectores o la aparición de nuevos competidores. Existe por tanto una imperiosa necesidad de provocar una aceleración en la internacionalización y la innovación, sendos pilares fundamentales que influyen en la mejora de la competitividad y el aumento del crecimiento de este entorno.

La creciente complejidad en la toma de decisiones empresariales ha generado que se antoje necesario para estas compañías el hecho de contar con programas de

¹ Datos publicados por el INE el 18 de Diciembre de 2014, referidos a 2013.

investigación y desarrollo para potenciar su eficiencia. Y esto se ha logrado aprovechando las posibilidades que brindan las **TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación)** en los procesos de mejora de la producción, aportando inteligencia tecnológica a la toma de decisiones que permite incrementar la eficiencia, agilizar la cadena de suministro, ajustarse de forma flexible a las necesidades de la demanda, sincronizar los procesos de fabricación y disponer de una situación de planta en tiempo real.

De esa necesidad y de la importancia económica que representa el desarrollo de un sistema inteligente de manufactura surge el término “**manufacturing intelligence**”, que corresponde a un área de investigación que tiene como objetivo aprovechar las posibilidades que brindan las TIC en los procesos de mejora de la producción en las industrias manufactureras. Este enfoque persigue desbloquear el valor de los datos existentes obtenidos de diversas fuentes transformándolos en información útil que proporcione conocimiento imprescindible desde las máquinas y los sistemas de gestión para la mejora de las operaciones, de la toma de decisiones (manera en que se gestionan las ordenes de producción, control de capacidades, decisión de asignación y secuenciación) y monitorización de los procesos de fabricación. Para todo esto se usan reportes, resúmenes gráficos y análisis estadísticos que permiten transformar la ingente cantidad de datos producidos en conocimiento útil. Con el análisis de esta información se conseguirá reducir costes, aumentar la eficiencia y hasta mejorar el rendimiento y la productividad. Este sistema, en pocas palabras, aporta valor a la gestión y dirección de la empresa.

En el siguiente esquema podemos localizar de manera resumida los distintos elementos que entran a formar parte en manufacturing intelligence.

MANUFACTURING INTELLIGENCE			
	Operacionales	Tácticos	Estratégicos
Objetivo	Monitoriza Operaciones	Mide Progreso	Determina Estrategia
Usuario	Supervisores	Responsables, Analistas	Ejecutivos, Directores
Alcance	Operaciones	Departamentos	Compañía
Información	Detallada	Detallada/Resumida	Detallada/Resumida
Orientación	Monitorización	Análisis	Gestión
Alcance en el tiempo	Del mismo día KPI	Diario/Semanal PI	Mensual/Trimestral KRI
Ejemplo	OEE / TEEP / GAS Productividad Fabricación ¿MTTR, MTBF?	OEE / TEEP Semanal por Línea de Producción	OTIF DPFB Trimestral LCC, COO N-anual

OTIF, *On Time In Full*, mide el éxito de entregar exactamente lo que el cliente ordenó y en el día que debía ser entregado.

RFT, *Right First Time*, etc.

DPFB, *Number of customers who are Delinquent Paying their First Bill*, Número de clientes morosos primera factura.

Otros: LCC, COO, ...

(Lago Rodicio García, 2010)

El área de aplicación en manufacturing intelligence se centra en los procesos y operaciones que se generan dentro de la empresa, siguiendo un sistema de recogida de la información que se produce en la planta mediante la captura automática de datos para su análisis posterior. Conforme a estos resultados se llevará a cabo la oportuna toma de decisiones con vista a la mejora y la integración de todo el proceso en el ERP de la compañía.

1.3 Software de aplicación. Herramientas en red para el manejo de datos.

En cuanto al tipo de tecnología que se ha desarrollado para la manufactura, las principales herramientas que existen son el software de aplicación y las soluciones en red para el manejo de datos e Internet con una clara vocación de desarrollo del e-business y el comercio electrónico.

Software de aplicación

- MPR

Es la planificación de requerimiento de materiales. El cálculo en este caso tiene en cuenta la información inicial sobre la lista de materiales, el nivel de inventarios y el programa maestro de producción. El plan maestro de producción se alimenta de todos los ítems listados, estableciendo la cantidad de componentes requeridos para la fabricación. Junto con esta información, el MPR ajusta la cantidad de materiales necesarios, teniendo en cuenta el nivel del inventario y los requerimientos netos establecidos para un adecuado tiempo de entrega. MRP se centra en los requerimientos de materiales pero no considera otros recursos.

- MPRII

A diferencia del anterior, realiza la planeación de todos los recursos de la organización. Comprende un nivel de funcionalidad alto de la tecnología de información, ya que se trata de un software que se compone de sistemas integrados que incluyen la planeación de ventas, MRP y la planeación de requerimientos de capacidad.

- ERP

Es la planificación de recursos empresariales. Se clasifica como una tecnología de información de funcionalidad alta ya que se ha desarrollado como una herramienta para la integración de todas las funciones de la organización para cumplir con los requerimientos de los clientes. Puede administrar en su forma más sencilla los procesos de contabilidad, manufactura, finanzas y distribución, aunque su alcance es más amplio cuando se implementa en organizaciones más complejas.

Se diferencia del MRPII en el uso de interfaces gráficas, bases de datos relacionales, el uso de lenguaje de programación de cuarta generación, herramientas CASE en el desarrollo y arquitectura cliente/servidor.

El alcance de ERP es global a nivel de la empresa porque permite la integración de toda la información con el fin de darle a la dirección suficientes herramientas para una

toma de decisiones acertadas. El alcance en las aplicaciones más complejas puede incluir la interacción de la información entre los agentes de la cadena de abastecimiento.

Herramientas en red para el manejo de datos.

- EDI

Consiste en la transmisión electrónica de documentos comerciales y administrativos entre distintas aplicaciones informáticas siguiendo un formato estandarizado. De esta manera, la información entre las empresas pueda ser procesada sin intervención manual. Estas herramientas facilitan el comercio electrónico y hacen posible el envío entre empresas de formatos preestablecidos como órdenes de compra o facturas, todo de forma electrónica, sin que se antoje necesario el uso del papel. Esta herramienta permite básicamente la comunicación estandarizada entre fabricantes y proveedores.

- INTERNET

Internet ofrece un panorama enorme de desarrollo y apoyo para una pequeña y mediana empresa. La Red supone una nueva era donde entran en juego nuevos y diferentes métodos de resolución a los problemas creados por falta de capacidad del empresario.

El comercio electrónico es la herramienta que permite la comunicación entre empresas y consumidores por medio de Internet. Este apoya principalmente la función de mercadeo de la empresa, ya que permite manejar bases de datos de clientes con el fin de establecer estrategias de promoción orientadas a los diferentes segmentos de mercado, facilitando el intercambio comercial entre empresas y con los propios consumidores. Proporciona la oportunidad de ser más competitivos, crecer económicamente y conectar con el nuevo escenario de los negocios mundiales.

1. 4 Niveles de una empresa.

Las industrias manufactureras, como cualquier empresa, presentan una estructura organizativa jerarquizada en diferentes niveles operativos conforme a los cuales se distribuye el trabajo entre personas y departamentos que deben colaborar entre sí para alcanzar los fines trazados desde un primer momento. A modo de esquema orientativo, podríamos diferenciar varios niveles dentro de una empresa de estas características:

Nivel 0: El real de la fábrica.

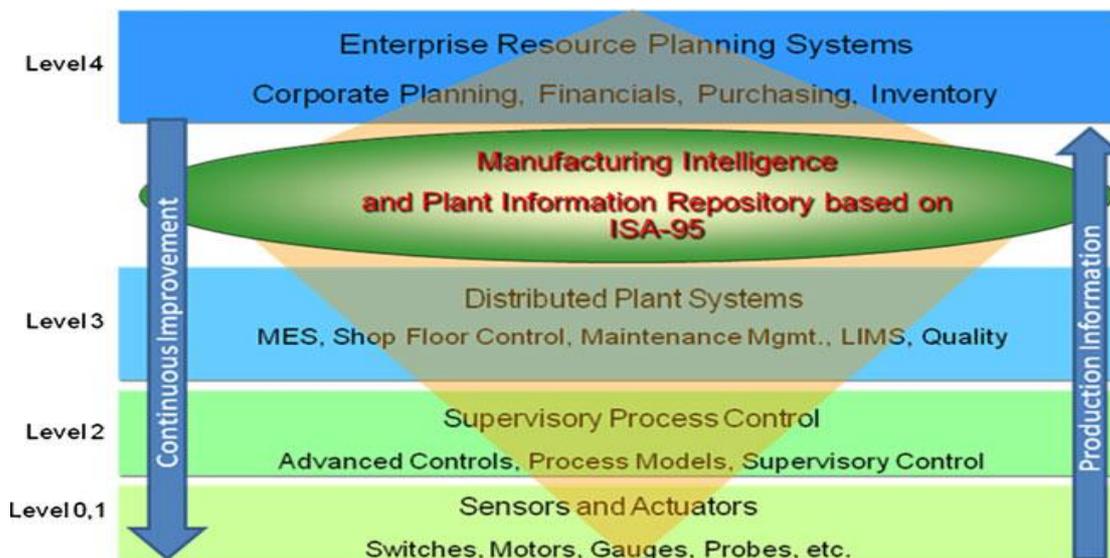
Nivel 1: Obtención de datos.

Nivel 2: Monitorización.

Nivel 3: Operativo.

Nivel 4: Estratégico.

MAPA DE INTEGRACIÓN DE DATOS

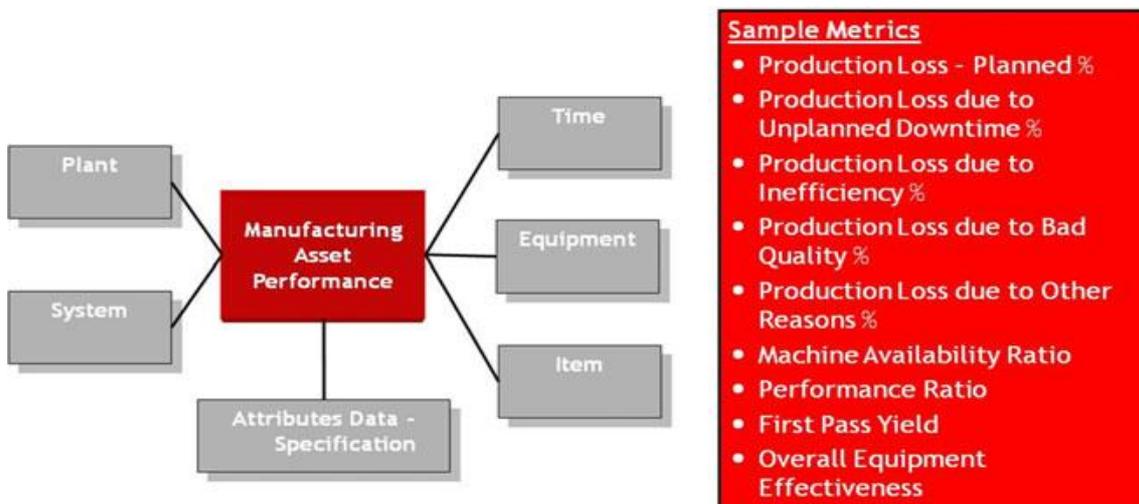


(Unver, 2013)

Esta estructura nos permite utilizar datos de los sistemas ERP relacionados con la organización, elementos que pueden ser transformados en información útil susceptible de integrarse en el modelo de producción. A este respecto podemos hablar

de turnos, artículos, categorías de artículos, costos de artículos, recursos, grupos, costos de recursos, horarios, órdenes de trabajo liberados, flujo, operaciones o requerimientos de materiales, datos todos ellos susceptibles de un análisis productivo.

Conforme al siguiente esquema, podemos hacernos una idea de la manera idónea en la que podríamos organizar datos no normalizados dentro de una estructura estandarizada:



(Unver, 2013)

El hecho de contar con una estructura normalizada como esta, ayuda a la integración de la información procedente de los cinco niveles de una empresa. A partir de esto, se realizarán los cálculos necesarios para sugerir cambios o automatizaciones de procesos de forma que se reduzcan o eliminen los procesos prescindibles y/o se optimicen los tiempos en la planta de producción.

El uso de los indicadores:

Para conseguir la pertinente información de los datos a analizar se trabaja con **indicadores**, expresión utilizada para describir actividades en términos cuantitativos y cualitativos con el fin de realizar evaluaciones de acuerdo con un método. Los indicadores son herramientas de gestión que ofrecen un valor de referencia a partir del cual se puede establecer una comparación entre las metas planeadas y el

desempeño logrado. De ese modo se proporciona información cuantitativa respecto al logro o resultado en la entrega de productos (bienes o servicios) y los efectos esperados de la política que maneje la empresa, midiéndose así el desempeño operacional. Los indicadores son por tanto medidas que describen de qué manera se están desarrollando los objetivos de un programa, un proyecto y/o la gestión de una institución, todo esto en términos de costo y niveles de calidad.

En manufacturing intelligence se distinguen, entre otros, dos tipos de indicadores:

- **KPI** (Key Performance Indicator): están relacionados con medidas a corto plazo, responsabilidades de individuos, eficiencia de equipos, líneas, etc. Se utilizan para monitorizar el rendimiento y la productividad de las operaciones con objetivos operacionales. Estos pueden actualizarse en tiempo real y generan eventos.
- **PI** (Performance Indicator): Indicadores a medio o largo plazo que permiten el seguimiento del progreso hacia los objetivos tácticos y estratégicos (proporcionan resúmenes).

¿Por qué son importantes los indicadores?

- Hablamos de herramientas potentes y útiles en la gestión.
- Inciden directamente en la planificación estratégica, base de la gestión del sistema.
- Son el reflejo objetivo de lo que realmente hacemos.
- Controlan, ayudan, redirigen y mejoran la gestión.
- Normalizan la recogida de datos.
- Abandonan el aislamiento en la gestión al adoptar criterios globales compartidos.

El objetivo de los indicadores es por tanto mejorar la gestión y los resultados de la empresa, son útiles como herramientas de evaluación, diagnóstico, comunicación, información y avance continuo.

Un indicador puede ser cuantitativo (valor numérico, ratio, porcentaje, etc.) o cualitativo (índices de satisfacción). Y a la hora de buscar sus principales

características, nos encontraríamos con una serie de elementos que refuerzan directamente la propia naturaleza del indicador: son informativos, fiables, válidos, adecuados, prácticos y comparables. Esta idiosincrasia les dota de una gran potencia.

Los desarrollos en el campo de la identificación de variables clave para la construcción de los KPI permiten implementar los últimos avances en materia de indicadores sintéticos (IS). Podemos definir a estos como la combinación o agregación matemática de los indicadores que representan los distintos componentes del concepto que se pretende evaluar a partir de un sistema de partida. Los indicadores sintéticos proporcionan una evaluación multidimensional, aspecto que facilita la interpretación de la información por parte de los usuarios y permiten evaluar de forma sencilla fenómenos complejos y multidimensionales.

Desde un punto de vista técnico, la construcción de un IS implica establecer un procedimiento matemático para agregar al mismo un conjunto de indicadores individuales (denominados sub-indicadores) y medir así los fenómenos multidimensionales que no podrían representarse a través de una única medida.

Los sistemas de monitorización de indicadores se utilizan principalmente para realizar seguimientos de las actividades que se desarrollan en la industria. Entre los usos más comunes podríamos destacar los siguientes:

- 1- Monitorizar rangos de valores para ejecutar alarmas visuales, sonoras o de cualquier otra índole.
- 2- Integrar en el sistema las incidencias o cambios relacionados con dichos indicadores.

1. 5 Almacenamiento de la información.

Una vez descrita la información que desprenden los sistemas y la manera en la que se están usando los distintos indicadores, pasamos a hablar de cómo se guardan todos estos datos de manera útil y organizada. Aquí entraría en juego el IMS.

El Information Management System (IMS) es un gestor de bases de datos jerárquicas de tipo transaccional con alta capacidad de proceso. Las funcionalidades de IMS relacionadas con el almacenamiento de los datos reciben el nombre de IMS DB (IMS DataBases). Por otro lado, las funcionalidades vinculadas a la gestión transaccional (la forma en la que los datos pueden relacionarse) reciben el nombre de IMS TM (IMS Transaction Manager). Este gestor proporciona un entorno sencillo, fiable y estándar para la ejecución de transacciones de alto rendimiento. También hay que destacar la posibilidad que ofrece como gestor a la hora de deshacer acciones, usando un extenso sistema de registro capaz de soportar grandes cantidades de información sin repercutir en el tiempo de respuesta.

1. 6 Herramientas para modelizar.

Llegados a este punto, nos hacemos la siguiente pregunta: ¿qué es el modelo del sistema? La respuesta sería la descripción de las características de interés que se desprende de un proceso de abstracción denominado modelado. Aquí entraría en juego el Mapa del Flujo del Valor o Value Stream Mapping (VSM), una herramienta que permite analizar los flujos de materiales y la información que se necesita para poner a disposición del cliente determinado producto o servicio. Antes era conocida como Mapa de Flujo de Materiales e Información. El VSM se utiliza en Lean Manufacturing, un modelo de gestión enfocado a la creación de flujo para poder entregar el máximo valor posible al cliente utilizando los mínimos recursos.

Esta herramienta se basa en una técnica gráfica que posibilita visualizar todo un proceso, permitiendo detallar y comprender completamente el flujo tanto de información como de materiales necesarios para que un producto o servicio llegue al cliente. Con esta técnica se identifican las actividades que no agregan valor al proceso para posteriormente iniciar las actividades necesarias para eliminarlas. VSM es una de las herramientas más utilizadas para establecer planes de mejora. Su precisión se basa en que enfoca las mejoras en el punto del proceso en el cual se obtienen los resultados

óptimos, dando respuesta a las necesidades planteadas por las empresas manufactureras con vista a desarrollar cadenas de valor más competitivas, sólidas, eficientes y flexibles con las que afrontar las dificultades de la economía actual. El propósito del VSM es por tanto resaltar las fuentes de desperdicios. Por este motivo, la implementación debe hacerse en un periodo corto de tiempo.

En el VSM permite identificar:

- Los procesos “cuello de botella”.
- Dónde se desperdician productos.
- Dónde se desperdician recursos (tanto humanos como máquinas).
- La definición de inventarios máximos y mínimos.
- Cuál es el flujo que debería ser modificado.

Para implementar un VSM se deben realizar una serie de pasos de forma sistemática que se describen a continuación:

- 1) Identificar el producto o servicio.
- 2) Dibujar el estado actual del proceso mostrando cada una de las etapas, las esperas y la información que se requieren para entregar el producto o servicio. Existen símbolos estandarizados que representan los distintos elementos de la cadena de valor.
- 3) Analizar la visión sobre cómo debe ser el estado futuro. En esta etapa se debe establecer cómo funcionará el proceso en un plazo corto. También será necesario analizar y responder a una serie de preguntas: ¿qué procesos se integran?, ¿cuántos operarios requiere la línea?, ¿cuántos equipos existen?, ¿qué espacios hay? y ¿cómo evoluciona el stock en proceso? Otro detalle clave está en identificar sobre el mapa los desperdicios que se van encontrando (hablamos de todo aquello que no es valioso para el cliente). Para ello suelen buscarse los siete desperdicios según el Lean: sobreproducción, tiempo de espera, transportes innecesarios, exceso de procesado, inventario, movimientos innecesarios y defectos.

- 4) Dibujar el VSM futuro (o mapa de estado futuro). Se trata de dilucidar el mapa definitivo una vez se eliminen los desperdicios.
- 5) Plasmear un plan de acción e implementar mejoras.

Para llegar al estado futuro resulta básico hacer los cambios pertinentes que deben estar plasmados en un plan de acción y realizar un seguimiento de las acciones de mejora hasta alcanzar el objetivo.

1.7 Componentes del modelo de industria.

Las componentes del modelo describen la situación de partida y por tanto permiten realizar una evaluación del impacto potencial y real del paradigma antes y después de su implantación.

Podríamos delimitar los siguientes elementos en un modelo de industria:

- **Tareas de control**

Maneras en las que se gestionan las órdenes de producción, el control de capacidades así como las decisiones de asignación y secuenciación.

- **Variables del proceso para el control de fabricación**

Contemplan tanto las variables de entrada y salida como la secuencia en la que se procesan los pedidos.

- **Variables de control**

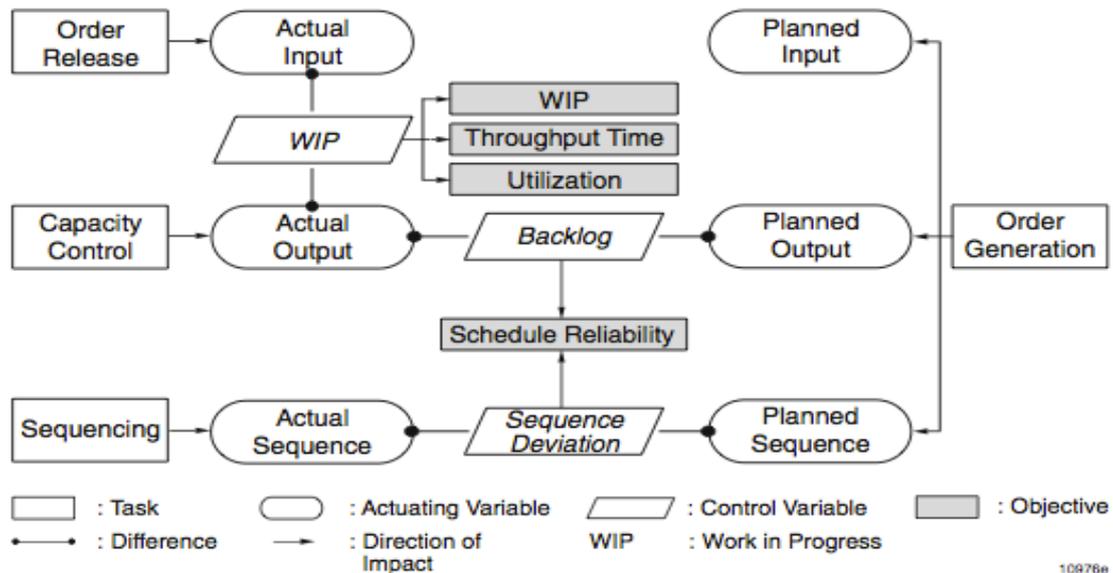
Cuantifican las desviaciones entre dos variables de proceso. Entre las variables de control podemos destacar las siguientes:

- *WIP (Work in Process): Diferencias entre entradas y salidas reales.

- *Backlock: Diferencias entre resultados previstos y salidas reales.

- *Sequence Deviation: Diferencias entre la secuencia lineal y la planteada.

A modo ilustrativo, mostramos en el siguiente esquema la fase de evaluación (assessment) de un modelo de control de fabricación en el que podemos identificar los distintos componentes que entran en juego en un modelo de industria:



(Lödding, 2013)

1.8 Modelo de producción.

El sistema de control de manufactura en un proceso de producción se compone de elementos software y diferentes entidades físicas relacionadas con el entorno de fabricación: recursos, productos, pedidos de clientes, operaciones de coordinación...

Las principales funciones de un sistema de control de manufactura son las siguientes:

- Funciones relacionadas con proceso. Se pueden considerar como tales las rutas de producción y el tratamiento de órdenes de producción.
- Planificación y programación de producción. La planificación de producción es el proceso mediante el cual se seleccionan y secuencian las actividades asignando de forma idónea los recursos necesarios para la fabricación de

tareas. Es necesario identificar la secuencia y establecer un calendario para cumplir los parámetros establecidos y lograr los objetivos fijados.

- Ejecución del plan.
- Manejo de es estados anormales, bloqueos y errores.

El **modelo de control de fabricación** se basa en la modelización de los objetivos logísticos y consta de cuatro elementos principales:

- Las tareas de planificación y de control de la producción.
- Los factores de influencia.
- Las variables de control.
- Los objetivos logísticos.

Estos elementos están vinculados entre sí por sus interacciones de tal forma que las tareas de planificación y control de la producción acaban determinando los factores de influencia. Por su lado las variables de control, que son el resultado de la desviación de dos variables de proceso, determinan los objetivos logísticos.

Hay que tener en cuenta que las estrategias de control de un sistema de manufactura pueden verse afectadas por requerimientos específicos que pueden influir en que el desempeño del sistema cambie. Los requerimientos específicos pueden estar provocados por el comportamiento del cliente, la gama de los productos, los cuellos de botella consecuencia de fallas en las máquinas, los cambios de prioridad en los trabajos o la llegada de nuevas órdenes, entre otros.

1.9 Tipos de sistemas de control de Manufactura

Entre los distintos tipos de sistemas de control de manufactura destacamos tres:

1.9.1 Sistemas de control a eventos discretos. DES (Discrete event systems)

Un sistema a eventos discretos tiene un espacio de estados finito y numerable. Su comportamiento se caracteriza por una secuencia de estados delimitados por eventos que ocurren de manera asíncrona.

Las características principales de un sistema a eventos discretos son:

- Son asíncronos. Esto se explica porque algunos eventos pueden ocurrir en cualquier momento, sin ningún tipo de periodicidad o continuidad.
- Están dirigidos por eventos. Cuando ocurre un suceso cambia el estado del sistema.
- Son secuenciales. Pueden existir eventos que guarden una cierta secuencia de manera que para que ocurra uno antes debe de haberse dado el anterior.
- Presentan sincronización. De aquí nace el problema de retrasar la ejecución de un proceso hasta que se cumpla una determinada condición.
- Presentan concurrencia (pueden ocurrir varios eventos al mismo tiempo).
- Pueden representar conflictos o exclusión mutua. El conflicto se presenta cuando un recurso es compartido por varias entidades y se resuelve intentando que no se puedan presentar al mismo tiempo dos solicitudes del recurso.

1.9.2 Sistemas de control de manufactura basado en agentes

Se trata de un sistema de control distribuido en el que el sistema completo se divide en partes o módulos autogestionados que interaccionan entre sí en función de los agentes.

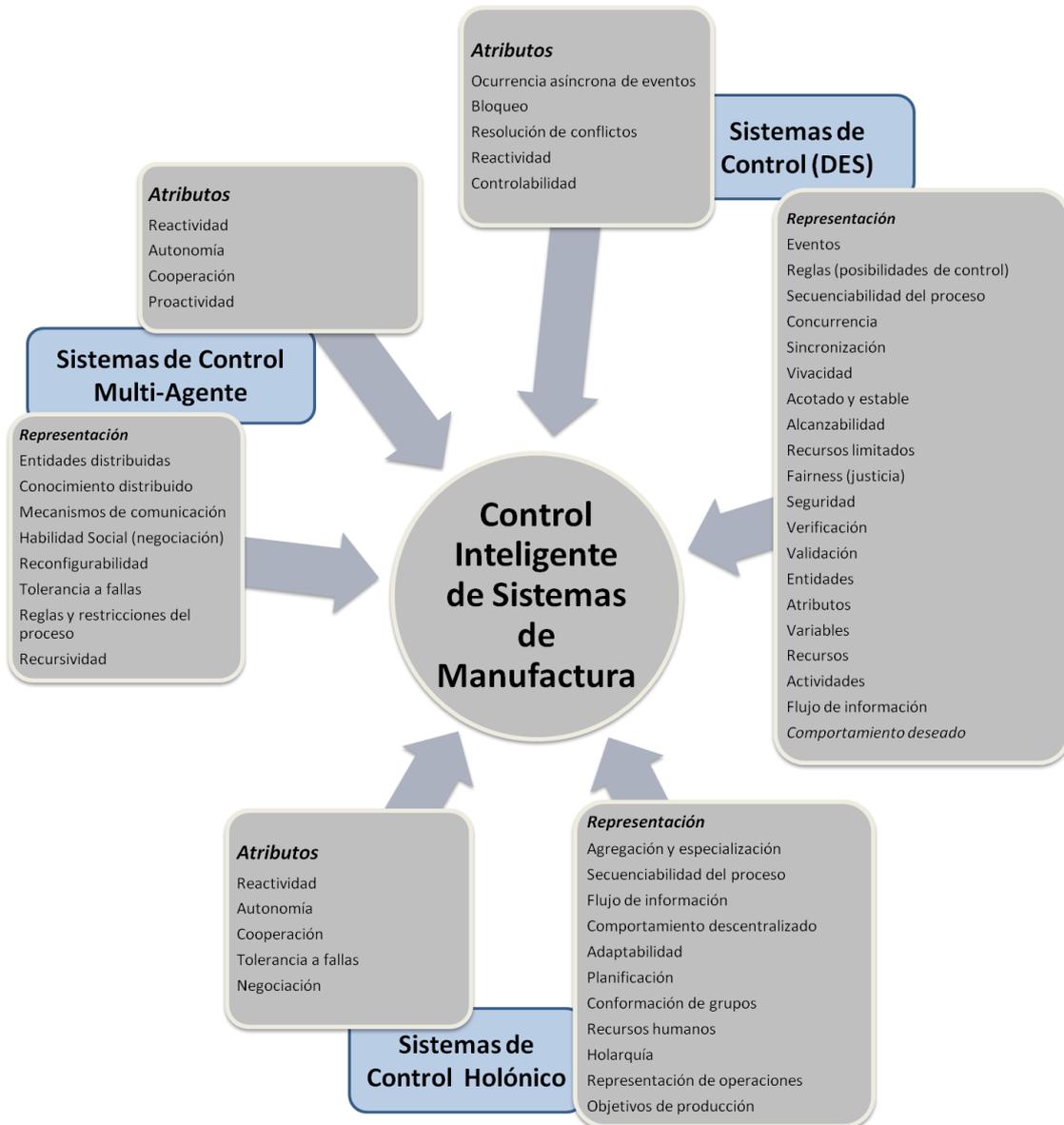
Los agentes son entes del sistema informático que representan a todos y cada uno de los elementos del sistema considerados como individuales. Los agentes son autónomos, organizados, reactivos y permiten realizar una gestión de la información de forma instantánea.

1.9.3 Sistemas de control de manufactura basados en sistemas holónicos.

Estos sistemas se basan en organizaciones altamente distribuidas donde la inteligencia se distribuye sobre entidades individuales llamadas holones, entendiéndose a estos como entidades autónomas, cooperativas e inteligentes.

Holón es un bloque de construcción de un sistema de manufactura que tiene la capacidad de controlarse a sí mismo. Estos tienen cierto grado de razonamiento local, capacidad de decisión, comportamiento autónomo y cierta habilidad para comunicarse de manera interactiva con otros holones. Esta funcionalidad es utilizada para transformar, transportar, almacenar y/o validar información de objetos físicos. El holón está conformado por una parte de procesamiento de información (componente de software) y una de procesamiento físico opcional (componente de hardware).

A continuación se muestra un gráfico que resume las características de los distintos tipos de sistemas de control de manufactura mencionados anteriormente:



(Henao, 2009)

1.10 Representación de un problema genérico.

La representación de un problema genérico viene dada por cinco elementos:

- I. Número de trabajos.
- II. Número de máquinas.
- III. Tipo de procesamiento de los trabajos en las máquinas.
- IV. Conjunto de parámetros que indican las hipótesis incumplidas. Hipótesis del modelo básico:

Sobre los trabajos: el número de trabajos es conocido y fijo. Todos son independientes, están disponibles en el instante inicial y tienen la misma importancia. Pero hay que tener en cuenta la siguiente circunstancia: en términos de producto acabado, cada trabajo se relaciona con diferentes procesos (máquinas) a la vez; pero por otro lado cada trabajo solo puede vincularse a una máquina en cada instante del proceso de producción. Así, podemos encontrar diferentes estados para cada trabajo:

- A la espera para ser procesado por la siguiente máquina.
- Siendo procesado por una máquina.
- Completo.

Sobre las máquinas: el número de máquinas es conocido y fijo. Todas las máquinas son independientes, están disponibles en el instante inicial y tienen la misma importancia. Cada máquina procesa todos los trabajos que tiene asignados y procesa un solo trabajo en cada instante. Podemos encontrar a las mismas en alguno de los siguientes estados, dependiendo del momento:

- Procesando un trabajo.
- Esperando al próximo trabajo.
- Parada, tras haber completado el último trabajo.

Sobre procesos y recursos: La cantidad de recursos requeridos por cada trabajo y los tiempos de procesamiento son fijos e independientes de la secuencia. Cada operación debe ser completada sin interrupción.

- V. Criterio de optimalidad. Este depende de los objetivos prefijados y normalmente hace referencia a la minimización de las siguientes medidas: costos totales; tiempos de procesamiento, consumación o espera; tardanzas, desfases y desocupación de máquinas. También es muy común que se den situaciones en las que no exista un único objetivo, sino varios, entrando en juego criterios múltiples. Todo lo anterior es válido siempre que los parámetros del modelo sean determinísticos. En el caso en el que entre en juego la probabilidad, el concepto de optimalidad cambia, puesto que los valores que tomará la variable a optimizar seguirán una distribución de probabilidad que dependerá de las distribuciones de los parámetros del modelo.

1.11 Procesos de fabricación.

Respecto a los procesos podríamos decir que la fabricación moderna incluye todos los procesos intermedios requeridos para la producción y la integración de los componentes de un producto. Podemos definir como proceso industrial al conjunto de operaciones unitarias necesarias para modificar las características de las materias primas. Dichas características pueden ser de naturaleza muy variada como la forma, la densidad, la resistencia, el tamaño o la estética.

La forma en la que se fabrican los productos se puede clasificar en dos grandes grupos:

Producción en serie: Un producto se fabrica en serie cuando se hace un gran número de copias idénticas del mismo.

Producción en cadena: Una cadena de producción es un sistema para fabricar en serie un producto de manera más eficiente. Se llama cadena de producción porque cada paso en la fabricación de un producto se hace en un lugar diferente. En cada lugar los

trabajadores (o las máquinas) realizan la misma actividad repetidamente con productos semielaborados que van avanzando de un eslabón a otro dentro de esa cadena. De este modo se completan muchas más unidades al día que si un trabajador se dedicara a realizar una pieza completamente desde el principio hasta el final.

1.12 Estructura de los procesos.

En la organización de la producción, cada trabajo es una secuencia de operaciones que deben ser procesadas durante un tiempo determinado en una máquina en concreto, persiguiendo siempre alcanzar un tiempo de procesamiento reducido.

Existen dos estructuras básicas de procesos: Flow Shop (línea de flujo) y Job Shop.

1.12.1 Flow Shop.

En este caso todas las órdenes tienen la misma ruta. Cada trabajo está constituido por m operaciones, $J_i = \{O_{i1}, \dots, O_{im}\}$ $i=1..,n$ tales que: $O_{i1} < O_{i2} < \dots < O_{im}$, teniendo que ser procesada O_{ik} en la máquina M_k .

Es un proceso menos flexible que el Job Shop pero mucho más simple de gestionar.

1.12.2 Job Shop.

Cada orden tiene una ruta de producción propia. No se pueden procesar dos operaciones consecutivas de un mismo trabajo en la misma máquina.

Es un proceso flexible pero difícil de gestionar. Cada tipo de producto puede tener su propia ruta de producción y con máquinas agrupadas por función.

1.12.3. Open Job Shop

De estas estructuras básicas derivan diferentes variantes y especializaciones, como por ejemplo las órdenes abiertas (**Open Job Shop**). En esta estructura de procesos, las órdenes se agrupan en varias rutas (productos) comunes. Varias órdenes pueden usar

partes del mismo inventario. Combina flexibilidad del Job Shop con el bajo costo y simpleza del Flow Shop. Las órdenes fluyen entre las celdas (grupo automatizado de diversas máquinas) como si fuera Job Shop, pero dentro de la celda se pasa de máquina a máquina como si se tratara de un Flow Shop.

1.13 Formulación general de los problemas de Scheduling.

Haciendo referencia a lo que dice Blazewicz (J. Blazewicz, 1994), los problemas de planificación de tareas (Scheduling) pueden ser descritos ampliamente como: *"el problema de acomodar los recursos en el tiempo para realizar un conjunto de tareas"*.

El planificador es un componente funcional muy importante de los sistemas operativos multitarea y multiproceso. Consiste en la asignación de intervalos de tiempo respetando las restricciones impuestas derivadas por ejemplo de la secuenciación.

Los problemas de Scheduling pertenecen a una subclase de problemas CSP (satisfacción de restricciones) que aparecen con frecuencia en la vida real en numerosos entornos productivos y de servicios. Podemos encontrar problemas de esta familia en muchas áreas de la industria, la administración y la ciencia. Son contratiempos que van desde la organización de la producción hasta asignación de puertas de embarque en un aeropuerto o la planificación de horarios ferroviarios. Los problemas de Scheduling son en general NP-duros, lo que implica que tienen gran complejidad y no pueden resolverse de manera eficiente mediante estrategias exactas. Para su resolución se han aplicado prácticamente todas las técnicas de Inteligencia Artificial con mayor o menor éxito.

Los problemas de Scheduling requieren organizar en el tiempo la ejecución de tareas que comparten un conjunto finito de recursos y que están sujetas a un conjunto de restricciones impuestas por diversos factores como por ejemplo, las características físicas del entorno, las relaciones temporales o la normativa laboral. El problema

consiste en optimizar uno o varios criterios que se representan mediante funciones objetivo y que suelen estar relacionados con el coste o el tiempo total de ejecución.

Los recursos y las tareas pueden tomar diferentes formas. Por ejemplo, los recursos pueden ser máquinas en un taller, pistas de aterrizaje en un aeropuerto, el equipo de trabajo en una obra en construcción o las unidades de procesamiento en un entorno de computación. Las tareas pueden ser unidades de trabajo en un proceso de producción, los despegues y aterrizajes en un aeropuerto, las fases de un proyecto de construcción o la ejecución de programas de ordenador. Cada tarea puede tener asignada una prioridad, un tiempo de inicio y un tiempo de fin límite.

Los objetivos también pueden tomar diversas formas como por ejemplo la minimización del tiempo de fin de la última tarea (este es el criterio de optimización más común y es denominado makespan). También podríamos encontrar objetivos que busquen la minimización del retardo en las tareas que ya hayan alcanzado su tiempo límite (criterio conocido como minimización del tardiness). Otras posibles funciones objetivo pueden ser el Maximum Lateness (donde se intenta minimizar el máximo incumplimiento del tiempo de entrega) o el Total Flow time (que consiste en minimizar la suma de los tiempos de finalización de todos los trabajos).

El proceso general de Scheduling puede definirse siguiendo los pasos descritos a continuación:

1. **Secuenciación:** Se refiere a la organización sucesiva de un conjunto de órdenes que guardan relación entre sí siguiendo unas determinadas reglas y con vista a llevar a cabo su procesamiento.
2. **Asignación:** Se trata de vincular cada orden a los distintos recursos siguiendo la secuencia definida en el paso anterior y teniendo en cuenta las restricciones, tanto las de precedencia como las de disponibilidad de los medios.
3. **Evaluación de la función objetivo:** Persigue medir los resultados de la asignación obtenida en el paso anterior respecto a los parámetros que se pretenden optimizar.

Estrategias de Scheduling:

- Estrategia de intervalo: Consiste en asignar intervalos de tiempo a los procesos respetando las restricciones impuestas, como por ejemplo las que se derivan de la secuenciación. Tiende a ser ineficiente ya que deja grandes lagunas de tiempo entre los distintos procesos.
- Estrategia de despacho: En este caso no existe un cronograma anticipado.
- Estrategia de tarea crítica: Se programan todas las actividades de la tarea más crítica. A continuación se procede a abordar la siguiente tarea crítica y así sucesivamente.
- Estrategia de recurso crítico: El recurso más importante (cuello de botella) se aborda primero y los otros recursos se programan alrededor del más crítico.
- Estrategia de operación crítica: Es una combinación de los dos anteriores. Aquí se identifica el par actividad/recurso con la mayor prioridad y se programa primero.
- Scheduling directo (Forward): Se programan las tareas en secuencia temporal creciente. Esta estrategia produce cronogramas factibles y compactos. El Forward no suele cumplir con las fechas de entrega. La secuencia en estos casos puede ser de despacho o crítica.
- Scheduling reverso (Backward): Se programan las tareas a partir de sus fechas de entrega en secuencia temporal decreciente. Es posible que genere cronogramas no factibles. Aquí la secuencia también puede ser de despacho o crítica.

- Estrategias de despacho heurístico: Son métodos de despacho directo donde en cada punto de decisión (secuencia, tiempo, ruteo, etc.) se usan índices de prioridad obtenidos mediante alguna regla heurística.
- Estrategia combinatoria: Se evalúa algún subconjunto de los posibles cronogramas mediante la búsqueda de combinaciones. En este caso existe una búsqueda de soluciones óptimas mediante programación matemática entera. Este método demanda grandes tiempos de computación y mucha memoria.

1.14 Reglas de secuenciación.

En la organización de la producción podemos definir distintas reglas de secuenciación dependiendo del objetivo fijado. Entre ellas se pueden destacar las siguientes:

FCFS: El primer trabajo que llega es el primero en procesarse.

LCFS: El último trabajo que llega es el primero en procesarse.

SPT: Primero se aborda el trabajo que tenga menor tiempo de procesamiento.

DDATE: Se procesa primero el trabajo que tenga la fecha de entrega más próxima.

SLACK: En este caso se aborda en primer lugar el trabajo que tenga menor tiempo de procesamiento remanente. Se define de la siguiente forma: $Slack = (fecha\ de\ entrega - fecha\ actual) - (tiempo\ remanente\ de\ procesamiento)$.

RWK: Se da prioridad a los trabajos remanentes en todas las operaciones.

CUSTPR: Cuando la prioridad la impone el cliente.

Critical Ratio Rule: Considerando $CR = (tiempo\ remanente / trabajo\ remanente)$, si $CR > 1$ el trabajo estará adelantado y si $CR = 1$ el trabajo estará al día. En este caso tendrían prioridad los trabajos retrasados.

1.15 Job Shop Scheduling. Definición del problema Job Shop.

Llegados a este punto, profundizaremos en el problema del Job Shop Scheduling (Job Shop Scheduling Problem: JSSP), ya que en el ejemplo de aplicación propuesto en el

punto 2 del presente trabajo nos centraremos en estudiar parte de la planificación de un sistema real en ambientes Job Shop.

Dentro de la gran variedad de problemas de planificación, el JSSP se utiliza en muchos casos reales, generando numerosos estudios debido a que es catalogado como “problema-no polinomial completo” (NP complete), tal y como demostró Garey en 1976. En general se considera uno de los problemas de optimización combinatoria más difíciles ya que la relación entre el tamaño del problema y el tiempo de solución no es lineal. Esto supone que al aumentar la complejidad del problema, el tiempo de resolución se dispara y el algoritmo no es eficiente. Debido a la dificultad que presentan estos casos, resulta complicado el desarrollo de métodos exactos que encuentren una solución óptima en un tiempo razonable. Por lo tanto, el esfuerzo suele centrarse aquí en métodos heurísticos para encontrar de manera eficiente soluciones lo más cercanas posibles al óptimo

Definición del problema Job Shop:

El número de trabajos n y el número de máquinas m se consideran finitos y computacionalmente tratables. Bajo un ambiente de manufactura Job Shop se da un conjunto J de n trabajos J_1, J_2, \dots, J_n que deben ser procesados en un conjunto M de diferentes máquinas M_1, M_2, \dots, M_m . Cada trabajo J_j consiste en una secuencia de m_j operaciones o tareas $O_{j1}, O_{j2}, \dots, O_{jm_j}$ y deben programarse en el orden indicado.

Considerando el índice i para denotar las máquinas y j para los trabajos, definiremos los siguientes términos en relación al problema Job Shop:

- 1) Tiempo de procesamiento (p_{ij}). Si un trabajo j requiere procesamiento en la máquina i , entonces p_{ij} representará el tiempo de procesamiento del trabajo j en la máquina i . Cuando el índice i es omitido, denotará que el trabajo j sólo es procesado en una máquina.
- 2) Fecha de liberación (r_j): Es el momento en el que un trabajo j puede empezar a ser procesado.

- 3) Fecha de vencimiento (d_j): Se trata del momento en el que se espera que el trabajo j debería estar terminado. La finalización del trabajo después o incluso antes de esta fecha podría acarrear un costo.
- 4) Peso (w_j): Refleja la importancia o prioridad del trabajo j .
- 5) Fecha de terminación (c_j): Es el momento en el que termina de realizarse el trabajo j .

En la tabla que se muestra a continuación aparecen las medidas de desempeño que se suelen elegir para cuantificar el logro del objetivo respecto al tiempo dentro de un programa de secuenciación de tareas.

Medida	Significado	Formula
Tiempo total de flujo	Tiempo total requerido para terminar la ejecución de los n trabajos	$tf = \sum c_j$
Retraso del trabajo j	Tiempo de retraso del trabajo respecto a su fecha de entrega	$l_j = c_j - d_j$
Máximo retraso	El máximo tiempo de retraso	$\text{Max}(l_1, \dots, l_n)$
Retraso total	Tiempo de retraso de los n trabajos	$\sum l_j$
Tiempo de flujo del trabajo j	Es la suma de los tiempos de movimiento entre operaciones, tiempos de espera por no disponibilidad de las maquinas, tiempos de proceso (incluyendo tiempos de alistamiento) y retrasos resultantes de fallos en los recursos	$T_j = c_j - r_j$
Inventario en proceso (work-in-process, WIP)	Cualquier trabajo en una línea de espera, en movimiento o en proceso es considerado WIP	$\sum \text{Trabajos en proceso}$
Tasa de utilización de las maquinas	Porcentaje de tiempo que las maquinas permanecen ocupadas	$U = (\text{tiempo en uso} / \text{tiempo de trabajo disponible})$

(Jaime A. Giraldo, 2013)

Las medidas de desempeño más utilizadas son las siguientes:

1. Tiempo promedio en el sistema $tps = \sum c_j / n$
2. Tasa de utilización $tu = \sum p_{ij} / tps$
3. WIP promedio $wip = tps / \sum p_{ij}$
4. Retraso promedio $rp = \sum T_j / n$

Insta destacar que las medidas dadas por las expresiones (1) y (4) son de interés desde el punto de vista del cliente y las (2) y (3) son de interés para quien administra el sistema de producción.

Estas medidas de desempeño suelen estar interrelacionadas. Por ejemplo, en un Job Shop, minimizar el tiempo de flujo conlleva reducir el WIP e incrementar la utilización de las máquinas.

Cuando hablamos de Job Shop, encontramos que la literatura ha propuesto muchos objetivos a alcanzar cuando entra en juego la secuenciación de tareas en este tipo de problemas. Los más utilizados son los objetivos basados en el tiempo, siendo muy común la tendencia de medir el tiempo total de flujo.

A continuación plantearemos tres posibles objetivos que estarán sujetos a las mismas restricciones. Para comenzar, tomaremos como punto de partida un modelo básico de Job-Shop en el que existen N trabajos para ser procesados en M máquinas. En este caso, cada trabajo j_i consistirá en una secuencia de N_i operaciones o tareas y cada operación deberá ser procesada durante un tiempo C_i , en una máquina M_k .

Las funciones objetivo planteadas para este supuesto serían las siguientes:

- 1) Minimizar $C_{max} = \text{Max}_{1 \leq i \leq n} \{ C_{i,n_i} \}$ *Makespan.*
- 2) Minimizar $MIDJ_{max} = \text{Max}_{1 \leq i \leq n} \{ C_{i,n_i} \} - \text{Min}_{1 \leq i \leq n} \{ C_{i,n_i} \}$ *Tiempo de servicio del inventario.*
- 3) Minimizar $ML_{max} = \text{Max}_{1 \leq k \leq m} \{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} (\alpha_{i,j,k} \cdot t_{i,j,k}) \}$ *Carga de trabajo máxima de máquinas.*

Restricciones:

- 1) $C_{i,j} - C_{i,j-1} \geq \sum_{k \in U_{i,j}} (\alpha_{i,j,k} \cdot t_{i,j,k})$, $j=2, \dots, n_i$, $\forall i$
- 2) $(C_{i,j} - C_{p,q} - t_{i,j,k}) \cdot (C_{p,q} - C_{i,j} - t_{p,q,k}) \cdot \alpha_{i,j,k} \cdot \alpha_{p,q,k} \leq 0$ $\forall (i,j),(p,q),k$
- 3) $\sum_{k \in U_{i,j}} \alpha_{i,j,k} = 1$ $\forall i,j$
- 4) $\sum_{r=1}^{N_k} \beta_{i,j,k,r} = \alpha_{i,j,k}$, $\forall i,j$; $\alpha_{i,j,k}$, $\beta_{i,j,k,r} \in \{0,1\}$, $\forall i,j,k,r$

A raíz de estas restricciones planteadas, se antojaría necesario realizar una serie de aclaraciones:

- La ecuación (1) asegura las relaciones de precedencia entre las operaciones de un

trabajo.

- La ecuación (2) explica que cada máquina se puede asignar solamente a una operación en cada momento.
- La ecuación (3) establece que solo una máquina puede ser seleccionada entre el conjunto de máquinas disponibles para cada operación.
- La ecuación (4) obliga a que cada operación se procese con una prioridad en una máquina.
- Destacaremos que las variables de decisión son en este caso las alfas y las betas.

El makespan o tiempo de finalización de la última tarea es la función objetivo por excelencia. En general es la más estudiada en la literatura y con ella se busca que el tiempo de finalización del último trabajo sea mínimo.

1.16 Propuestas de implementación.

Los métodos desarrollados en el campo de la secuenciación de operaciones pueden dividirse en dos categorías. Por un lado encontraríamos los métodos exactos (métodos matemáticos), que proporcionan una solución globalmente óptima, pero pueden requerir un tiempo de computación muy alto. Por otro lado estarían los métodos aproximados (métodos heurísticos), que habitualmente proporcionan una solución razonablemente buena en un tiempo aceptable. Como mejora a los métodos heurísticos se generaron los métodos metaheurísticos.

1.16.1 Métodos exactos. Métodos matemáticos.

El inconveniente de este tipo de métodos es que en problemas “np-completos”, alcanzar soluciones exactas supone que el tamaño del problema crecerá exponencialmente.

En los métodos matemáticos deberán modelarse los siguientes aspectos:

- Las decisiones (secuencias, ruteos, tiempos).
- Las restricciones (disponibilidad, precedencia, políticas).
- El objetivo, que puede ser la tardanza, el makespan u otro.

Para la resolución del problema suelen utilizarse diferentes técnicas entre las que destacan:

- Programación entera (Branch and Bound).
- Métodos aproximados de búsqueda:
 - Algoritmos genéticos.
 - Vecindad.
 - Relajación Lagrangiana.

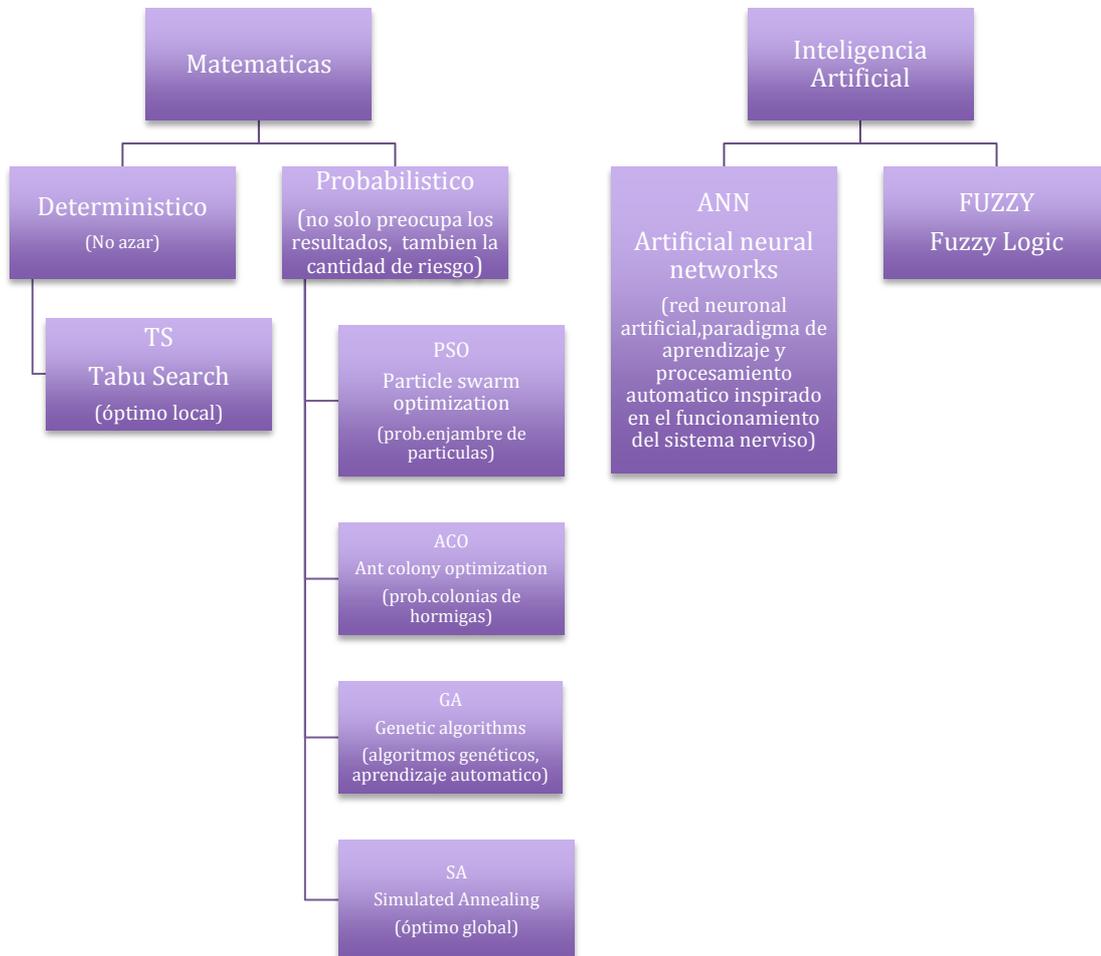
1.16.2 Métodos aproximados. Métodos mixtos.

Aportan una solución aproximada que puede ser evaluada e incluso coincidir con la óptima dentro de un tiempo de computación aceptable. Existen métodos mixtos tales como:

- Heurísticos.
- Sistemas expertos/ Inteligencia Artificial.

Los problemas involucrados en el sistema de producción no se pueden abordar solo con técnicas de optimización exacta ya que ninguna es capaz de enfrentarse por sí misma a los diversos problemas que surgen en la búsqueda de mejoras. Por ello hay que emplear distintas técnicas que abarquen todo el proceso. Se considera conveniente utilizar algoritmos híbridos que permiten la ejecución de diversas metaheurísticas en paralelo con la finalidad encontrar buenas soluciones mediante el uso de un tiempo de procesamiento muy reducido.

A modo de resumen, mostraremos en la siguiente gráfica los diferentes métodos de resolución en problemas de secuenciación conforme a la naturaleza del problema:



(C.Renzi, 2014)

1.17 Simulación.

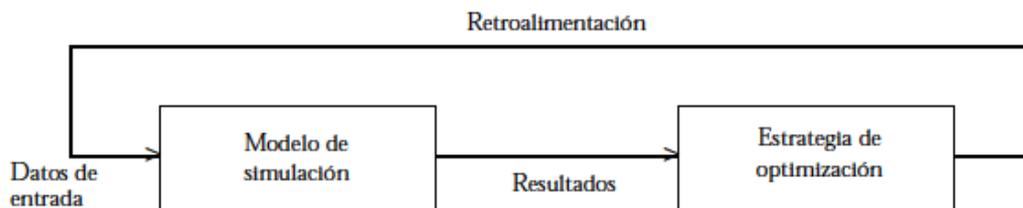
La simulación estadística constituye una de las áreas de mayor crecimiento en términos de análisis de datos. Se ha ido constituyendo como una de las herramientas fundamentales en la toma de decisiones.

Existen dos aspectos principales que han contribuido a su crecimiento durante la última década: el incremento de la velocidad de los ordenadores y la reducción de los costos de los mismos.

La simulación de procesos es una herramienta computacional. Esta permite analizar el comportamiento de un sistema con el fin de evaluar diferentes escenarios de las operaciones. De estas evaluaciones partirían posibles mejoras en la efectividad del proceso estudiado. Esta herramienta no está configurada para encontrar la configuración óptima de los recursos involucrados en el proceso. Solo posibilita la comparación entre distintas alternativas y la consiguiente selección de aquella opción que presente mejores resultados.

En respuesta a esta problemática surge como alternativa el concepto optimización en simulación, que integra un modelo de simulación tradicional con alguna herramienta de optimización que permita servir de motor de búsqueda para encontrar mejores soluciones.

DIAGRAMA DE OPTIMIZACION EN SIMULACION



De esta forma, la simulación puede considerarse como el proceso de diseñar una abstracción de un sistema real que permita experimentar mediante un modelo sin necesidad de llevarlo a cabo sobre el sistema real. Esto facilita una mejor comprensión del mismo y el establecimiento de políticas que probablemente nos acerquen a los resultados más deseados. La simulación permite entender las relaciones entre los elementos de un determinado sistema y replicar el comportamiento dinámico de los elementos ante diversos escenarios.

1.18 ¿Que se ha hecho hasta el momento?

Tal y como se ha reflejado anteriormente, uno de los problemas clásicos de la optimización combinatoria y la investigación de operaciones lo constituye el Job Shop, cuyas técnicas de resolución se llevan investigando desde hace medio siglo. En la actualidad, los problemas de dimensión 15x15 siguen considerándose intratables mediante el uso de métodos exactos. Para resolver tales problemas se han desarrollado numerosos métodos heurísticos, entre los que destacan múltiples algoritmos y heurísticas provenientes del campo de la Inteligencia Artificial y la programación matemática, como se describe en "*A state of the art review of the job-shop scheduling techniques*" (Anant Singh Jain, 1998). También podemos mencionar las contribuciones en algoritmos genéticos de Oliveira (2000) y el método de optimización híbrida de Wang y Zheng (2001).

Recientemente, los sistemas de fabricación holónicos han acabado constituyendo un nuevo paradigma de producción. Estos sistemas, incluidos dentro de las metodologías distribuidas, proponen nuevos esquemas de gestión de la fabricación que combinan auto organización, jerarquías dinámicas y relaciones horizontales (J.A. Araúzo 2014). Finalmente, cabría mencionar diversos estudios realizados sobre soluciones a problemas de secuenciación en configuración Job Shop flexible utilizando un algoritmo de estimación de distribuciones (R Pérez, S. Jöns, A Hernández, 2015).

2. EJEMPLO DE APLICACIÓN: LA INDUSTRIA DE CAJAS DE CARTÓN.

2.1 Introducción.

En muchas industrias manufactureras surge el problema de planificación de la producción de productos en línea. Un ejemplo relevante es la industria de fabricación de envase y embalaje de cartón ondulado, la cual está sometida a una fuerte competencia a nivel mundial. Este es un sector que se encuentra en constante renovación en mitad de un largo proceso de cambio tecnológico. En ese sentido no sólo importa la calidad del producto, ya que los clientes también exigen prontitud en la entrega y el debido cumplimiento de los plazos. La estrategia de las empresas fabricantes de embalajes de cartón ondulado se ha enfocado en ofrecer al cliente soluciones innovadoras dependientes de la tecnología, propuestas que permiten llevar a cabo el proceso de análisis y definición de necesidades. En estos casos se consiguen embalajes cada vez más eficientes y menos costosos, aprovechando al máximo la gran capacidad de adaptación que ofrece el cartón ondulado a la hora de resolver las necesidades concretas de cada cliente.

El cartón ondulado es uno de los materiales de envasado y embalaje más empleados a la hora de agrupar, almacenar, transportar, exponer y vender productos de consumo. Y tal y como viene sucediendo con casi todos los productos de su ámbito, no ha sido ajeno a la evolución general del mercado. Los productos de este sector se ofrecen a empresas y organismos conforme a una demanda que puede provenir del uso interno, las exigencias logísticas, el mercado o el marco legal. El consumo de embalajes es algo inherente a los productos, bienes o servicios y responde a la necesidad primaria de cualquier empresa que necesite embalar, almacenar, transportar o vender bienes de consumo (muchos de estos productos no podrían ser comercializados si faltara este elemento, de ahí su importancia).

La venta de embalajes de cartón ondulado está encuadrada principalmente en la comercialización de productos industriales de las empresas productoras o distribuidoras de bienes de consumo.

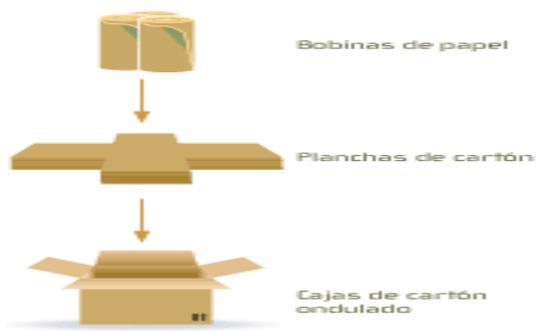
2.2 Etapas del proceso de fabricación.

El material básico para cada una de las operaciones que se llevan a cabo dentro de este sector son las bobinas de papel y el proceso productivo podríamos agruparlo en dos fases: fabricación de planchas de cartón y transformación o *converting* (esta última incluye todas las operaciones necesarias para transformar la plancha de cartón en embalaje plegado).

En cada fase intervienen una serie de máquinas no necesariamente idénticas. Las máquinas de una fase se pueden diferenciar en la velocidad a la que operan, el número de colores que pueden imprimir o el tamaño y forma de las cajas que producen. Cada orden de producción indica la cantidad de cajas de un tipo específico que se fabrican y los plazos de entrega de las mismas. Los tiempos de procesamiento de las diferentes operaciones son proporcionales al tamaño de la orden, es decir, al número de cajas en la orden.

Un retraso en la entrega implicaría una sanción en forma de pérdida de confianza. La magnitud de la penalización depende de la importancia de la orden o del cliente y del retraso en la entrega. Uno de los objetivos del sistema de planificación es minimizar la suma de estas sanciones.

Cuando una máquina cambia de un tipo de caja a otro, se requerirá un tiempo de puesta en marcha o de configuración (*Setup*). La longitud del tiempo de *Setup* depende de las similitudes entre dos órdenes consecutivas (por ejemplo, el número de colores en común, las diferencias en tamaños, etc.). Otro objetivo importante del sistema de planificación en estos casos es la minimización del tiempo total de *Setups*.



(Asimag S.L, 2007)

A continuación describiremos las distintas etapas del proceso de fabricación de las cajas de cartón mencionadas anteriormente.

2.2.1 Fabricación de planchas de cartón.

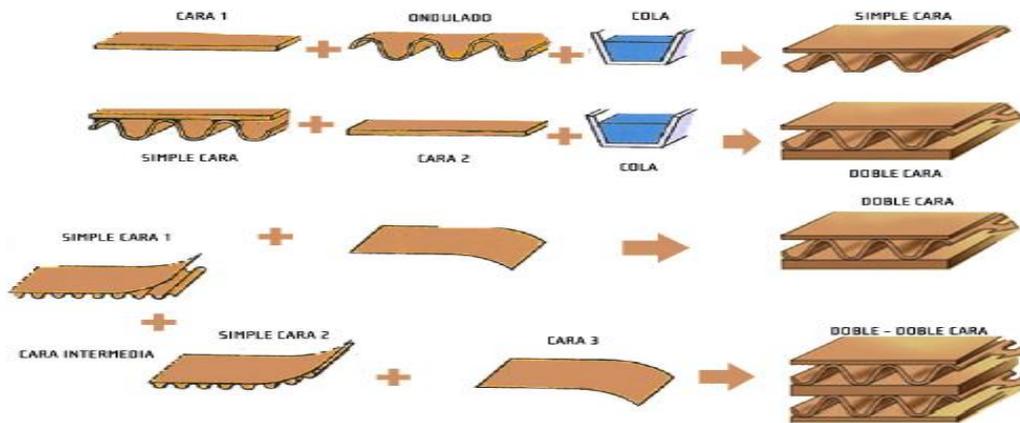
Para entender cómo se fabrican las planchas de cartón ondulado deberemos centrarnos en su estructura. Así, encontramos los siguientes tipos:

- 1) Simple-cara, formado por una hoja lisa y una ondulada unidas entre sí con cola. Este es el módulo elemental de todo cartón ondulado.
- 2) Doble-cara, que resulta de añadir al anterior una segunda hoja lisa. Si al doble-cara se le añade un segundo módulo simple cara, constituiría el llamada doble-doble (DD).
- 3) De la misma manera, un triple ondulado resulta de unir un doble-doble con un tercer simple cara.

El cartón ondulado doble cara y el DD constituye la mayor parte de la producción. El triple ondulado se reserva para usos específicos.

El gramaje de los papeles así como la altura de las ondas determinan su consistencia y sobre todo su resistencia a la compresión vertical. Este último parámetro es el más importante para productores y consumidores, puesto que indica el peso que puede soportar una caja si la sometemos a una carga por apilamiento.

A continuación y a modo de resumen, se muestra un cuadro de las distintas estructuras que puede tomar las planchas de cartón ondulado.



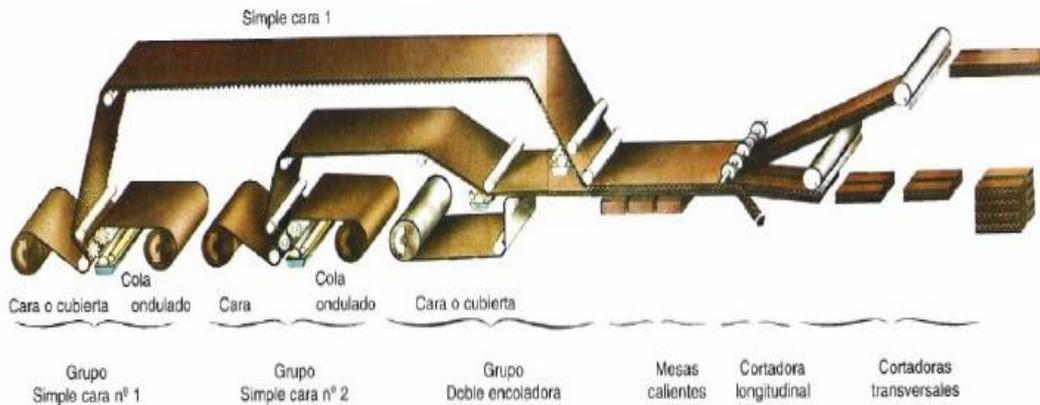
(Asimag S.L, 2007)

La fabricación de las planchas de cartón se realiza en el tren ondulator. Esta es la máquina que, partiendo de las bobinas de papel, permite la fabricación de planchas de cartón ondulado.

El tren ondulator está artificialmente dividido en 2 partes:

- 1) La parte "húmeda": es donde se ondula el papel. Para fabricar las planchas se pegan las distintas capas de papel, tanto las onduladas como las lisas. Su recorrido va desde la parte que recibe papel hasta el final de las mesas calientes (máquina diseñada para aportar el calor y presión necesarios para conseguir un buen pegado, eliminando el exceso de agua de la cola). En esta parte del proceso se busca mejorar la gestión de las materias primas y de los consumibles (papeles, colas, aditivos, etc.).
- 2) La parte "seca": En esta parte se cortan las planchas y el objetivo se dirige a la gestión de los formatos, los tamaños, las cantidades y los desperdicios. Para alcanzar estos objetivos, los automatismos y la informática juegan un papel creciente en lo que a control de los procesos se refiere. Su recorrido va desde la cortadora auxiliar hasta el sistema de salida.

Vista general esquemática de un tren ondulator



(Asimag S.L, 2007)

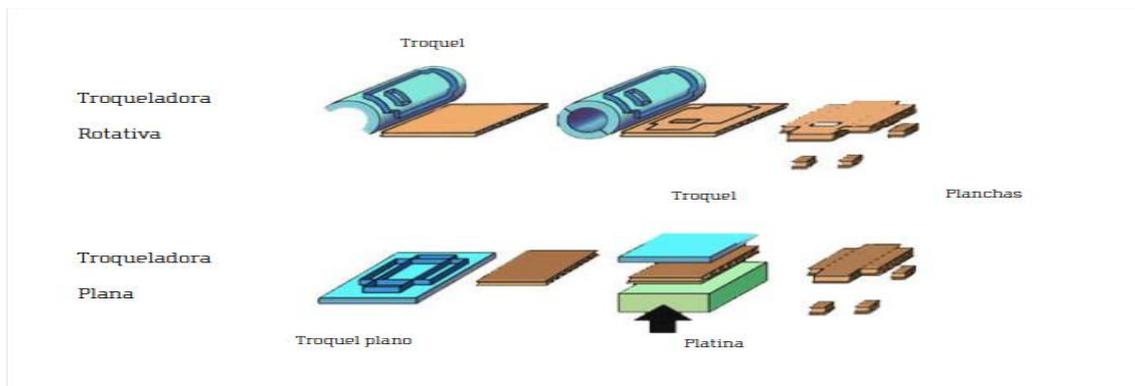
2.2.2 Converting.

La transformación o *converting* incluye todas las operaciones necesarias para transformar una plancha de cartón en una caja con un diseño y forma determinados. Las principales operaciones son:

- Impresión en plancha. El cartón ondulado utiliza básicamente la técnica flexográfica para impresión, haciendo uso de clichés para depositar la tinta sobre la plancha. Las impresoras pueden constituir una operación independiente dentro del flujo de fabricación o integrarse dentro del proceso de otras máquinas como las troqueladoras.
- Troquelado de la plancha. Puede ser de dos tipos: Troquelado plano (el troquel incide perpendicularmente sobre la plancha consiguiendo una gran precisión de corte) o troquelado rotativo (el troquel es semicircular e incide de forma oblicua sobre la plancha, por lo que la tolerancia en el corte puede alcanzar los dos milímetros).
- Plegado y pegado. Las plegadoras-pegadoras administran diferentes puntos de cola a la plancha y proceden posteriormente al plegado, de acuerdo con las especificaciones del embalaje.

- Grapado. Se aplica a algunas cajas que por sus grandes dimensiones necesitan fortalecer sus puntos de unión con un refuerzo extra como las grapas.
- Flejado y paletizado. Las paletizadoras automáticas se encargan de formar y etiquetar los paquetes del producto acabado, flejándolos y paletizándolos de acuerdo a las especificaciones de fabricación para su envío a almacén.

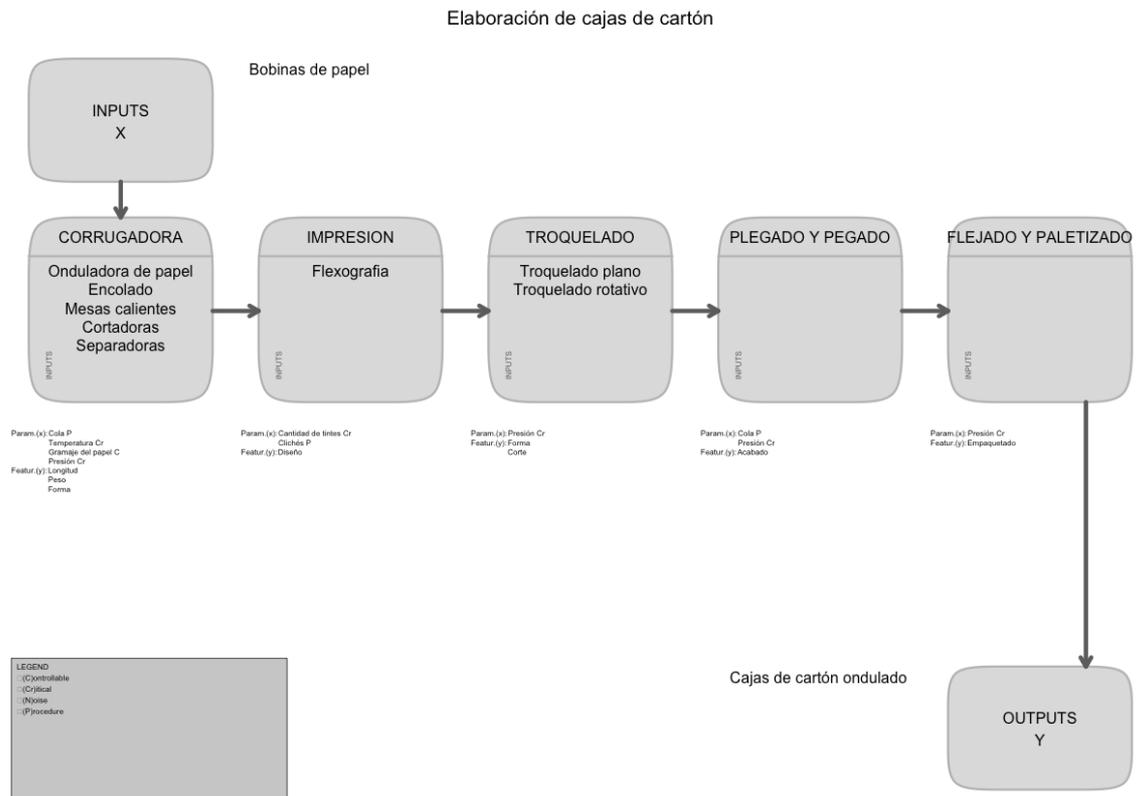
Tipos de troqueladoras.



(Asimag S.L, 2007)

2.3 Mapa de flujo. VSM.

A continuación se muestra el VSM de una fábrica de cajas de cartón elaborado utilizando la librería SixSigma de R:



2.4 Propuestas para la mejora de la eficiencia en las fases de producción.

Como propuesta para la mejora de la eficiencia en las fases de producción de las cajas de cartón definiremos a continuación los puntos críticos a tener en cuenta.

Respecto al **tren ondulator** los parámetros a estudiar serían los siguientes:

Mejora de la productividad

- Análisis de los tiempos de parada.

- Análisis de las velocidades de los trabajos (estudiando los puntos débiles y los cuellos de botella).
- Mantenimiento preventivo, correctivo y modificativo de las máquinas.

Mejora de la calidad

- Control de la temperatura (mejora de la planitud y el pegado).
- Control de la imprimabilidad (cortes limpios, evitación de dobleces, evitación de exceso de cola).
- Control del calibre (para evitar falta de resistencia).

Mejora de costes

- Reducción del desperdicio.
- Reducción del consumo de cola (puntos de gel, viscosidad, temperatura).
- Planificación (procesos y asignación de recursos).

Respecto a la fase de **converting** los parámetros a estudiar para la mejora serían:

Mejora de la productividad

- Análisis de los tiempos muertos de parada.
- Análisis de los tiempos de preparación.
- Fijación de velocidades de trabajo.
- Mantenimiento preventivo, correctivo y modificativo de las máquinas.

Mejora de la calidad

- Control de la impresión (planitud, superficie regular, control de estados de clichés, tintas)
- Control del troquelado (características y estados de troquelado adecuado)
- Control del calibre (para evitar la falta de resistencia).
- Control del paletizado (trazabilidad del palet terminado)

Mejora de costes

- Estandarización de calidades.

Respecto a la **planificación** se pueden considerar como prioridades para el estudio de mejoras los siguientes aspectos:

- Fechas de entrega.
- Combinación de calidades lógicas.
- Aprovechamiento de troqueles, clichés y tinteros en las distintas secuencias.

2.5 Tratamiento de datos.

El tratamiento de los datos se han realizado en R, aprovechando las ventajas que proporciona un lenguaje tan flexible y potente.

R es un software para el análisis estadístico de datos que utiliza un lenguaje de programación interpretado de manera que los comandos o fragmentos de código pueden ejecutarse sin necesidad de que tengamos que compilar el código. R proporciona además un lenguaje orientado a objetos y es bajo este término donde se esconde la simplicidad y flexibilidad del software. Al ser orientado a objetos, las variables, datos, funciones o resultados se guardan en la memoria principal del ordenador en forma de objetos con un nombre específico. El usuario puede modificar o manipular estos objetos con operadores (aritméticos, lógicos, y comparativos) y funciones (que a su vez son objetos), permitiendo además a los usuarios añadir funcionalidades mediante la definición de nuevas funciones.

R está escrito principalmente en C (con algunas rutinas en Fortran), pudiendo ser descargados tanto los ficheros fuentes como los binarios conforme a una amplia variedad de sistemas basados en Unix, Windows, y Macintosh.

Se trata de un dialecto de S, al igual que Splus, pero que cuenta con una implementación libre (significa que los usuarios tienen la libertad de ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, modificar y mejorar el software).

R proporciona una amplia variedad de funcionalidades estadísticas: modelos lineales y no lineales, tests estadísticos clásicos, análisis de series temporales, clasificación o

clustering, entre otras, todo ello con una alta capacidad de ampliación. Además, uno de los puntos fuertes de R es la facilidad para generar gráficas, incluyendo símbolos matemáticos o fórmulas y ofreciendo al usuario un gran nivel de flexibilidad.

R proporciona una serie de funciones básicas dentro del paquete base, pudiendo añadir nuevas funcionalidades específicas mediante la instalación de otros paquetes complementarios que expande su capacidad para estimar o solucionar diferentes problemas.

En este estudio he utilizado el paquete SixSigma para la realización del VSM que muestra el mapa de flujo de valor y permite visualizar todo el proceso de manufactura. Para llevar a cabo el análisis descriptivo y la realización de gráficas empleé el paquete Lattice, que proporciona gráficas avanzadas con capacidad para mostrar fácilmente relaciones multivariantes.

También he utilizado el paquete Lubridate en lo que se refiere al tratamiento de datos. Lo usé concretamente en el tratamiento de datos relacionados con fechas y horas. Este paquete permite manipular ese tipo de datos y realizar el cálculo de periodos de tiempo.

La herramienta informática utilizada para estudiar las posibles mejoras del sistema es la simulación. En el proceso de simulación podemos distinguir varias etapas:

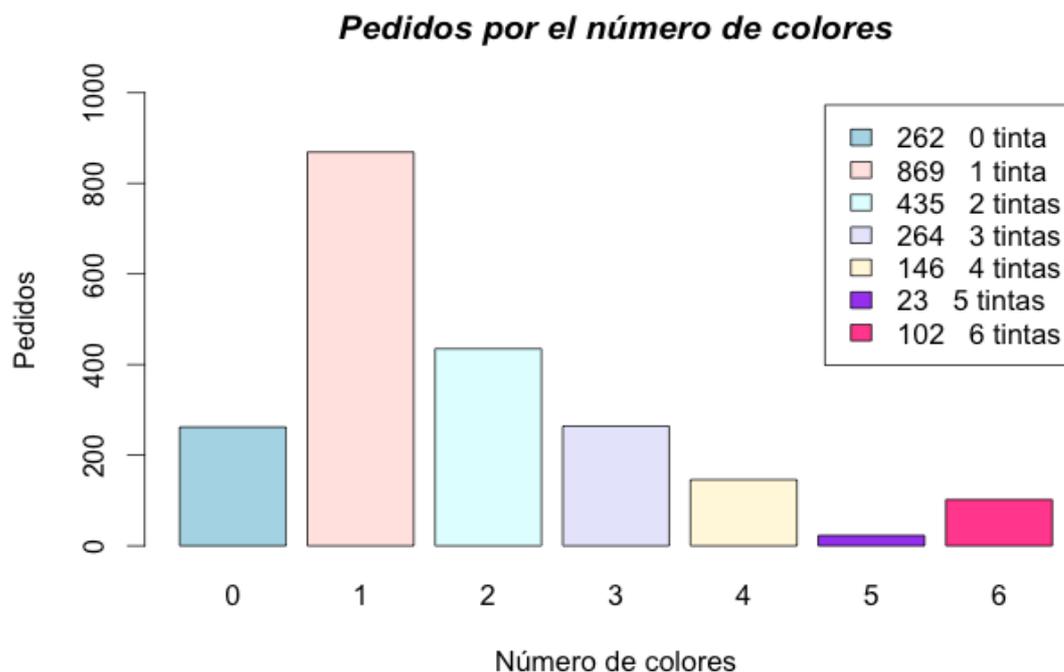
- Definición del sistema y traslación del modelo. Una vez recolectados los datos en bruto (*Raw Data*) se realiza un análisis preliminar de los mismos para estudiar su comportamiento. Esto nos permitirá determinar las variables que interactúan y sus interrelaciones.
- Planeación estratégica, con la que seleccionamos las variables a simular y la forma en que realizaremos la simulación.
- Experimentación. Constituida por la recolección y procesamiento de los datos simulados.
- Interpretación de resultados.

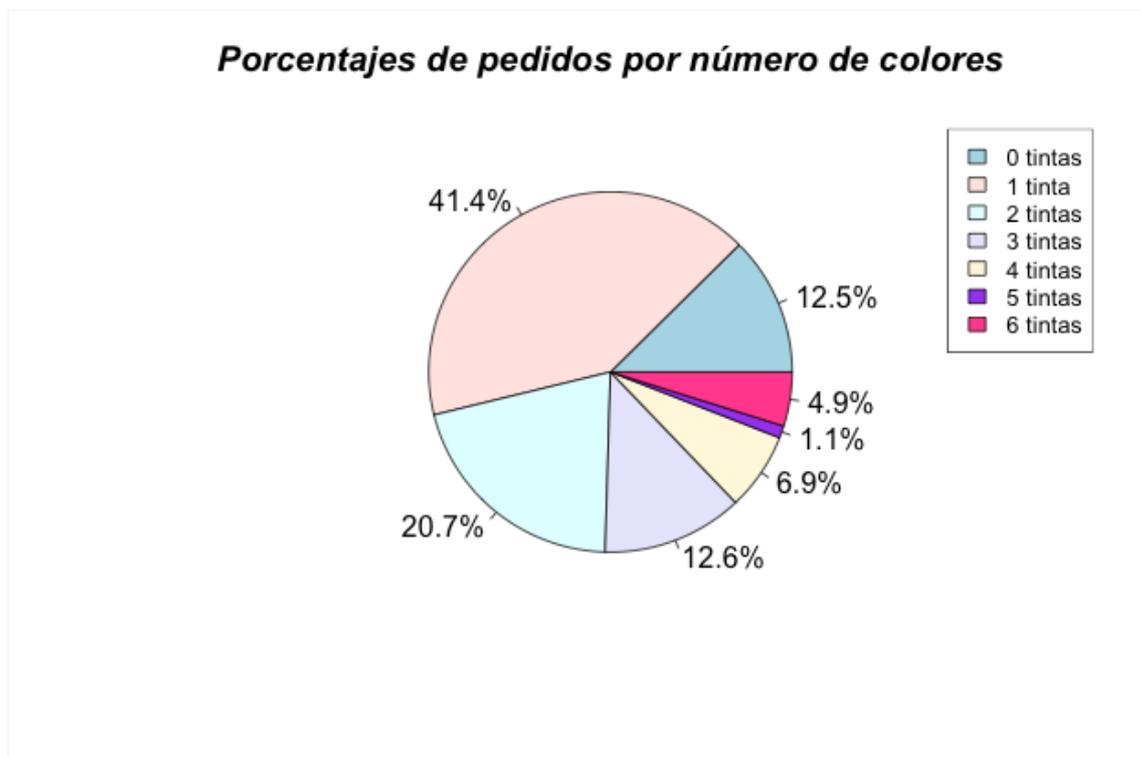
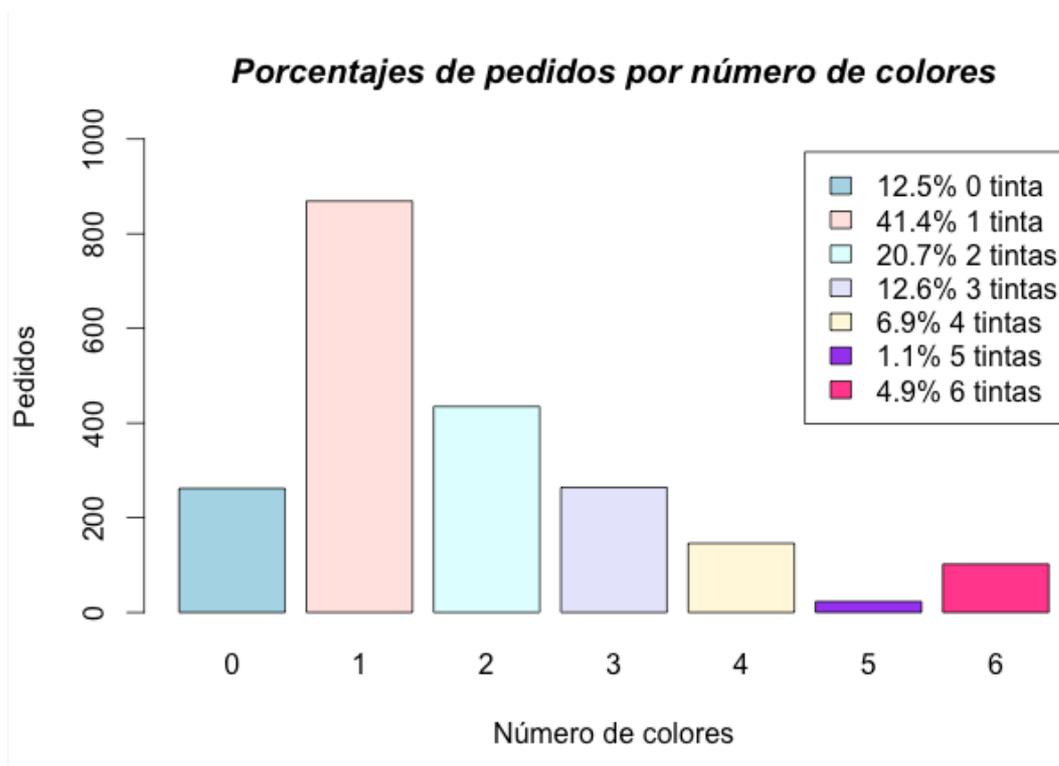
2.5.1 Análisis descriptivo:

Como etapa inicial del trabajo de aplicación, llevé a cabo el tratamiento de los datos de una fábrica de elaboración de cajas de cartón, partiendo de una muestra del año 2010. Realicé un análisis descriptivo de los datos para poder entender la situación en la que se encontraban los procesos de producción y las relaciones entre las distintas variables, todo con vistas a proponer una mejora.

La muestra que consideré constaba de 2.101 pedidos con 44 variables, destacando entre todas ellas los tiempos planificados, los tiempos fabricados, la fecha de planificación, la fecha de fabricación, el número de colores, los tipos de procesos empleados, los puntos de pegado, las máquinas planificadas, los distintos tipos de papel usados, etc.

En primer lugar estudié la cantidad de tintas que se utilizan en la elaboración de los pedidos. Las gráficas resultantes las muestro a continuación:

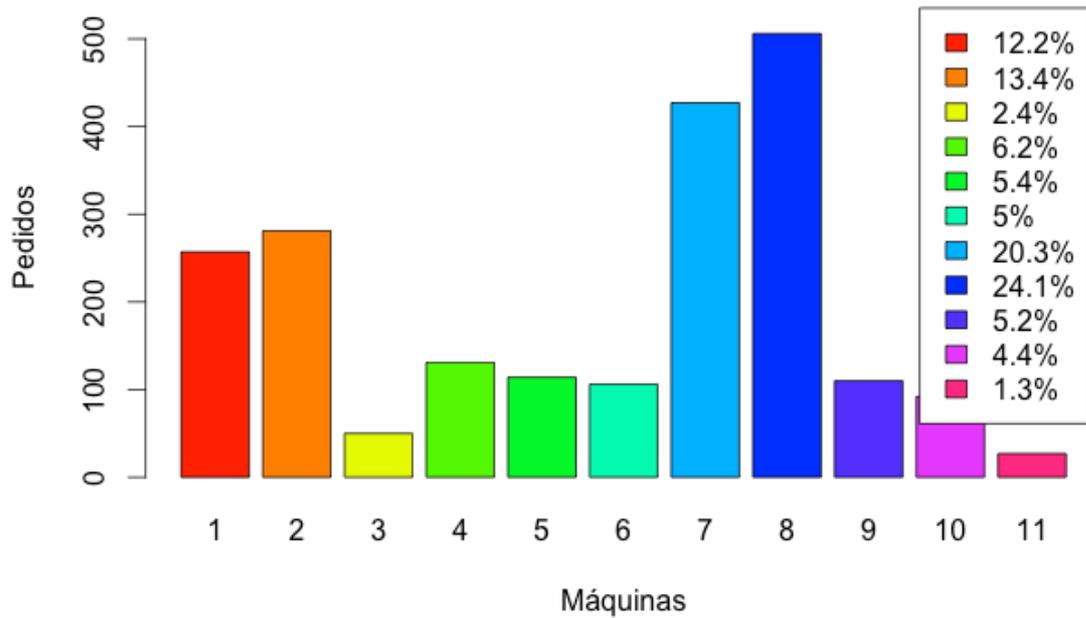




Aquí resalta el hecho de que el 41% de los pedidos que se ejecutaron sólo usó una tinta en su proceso de fabricación.

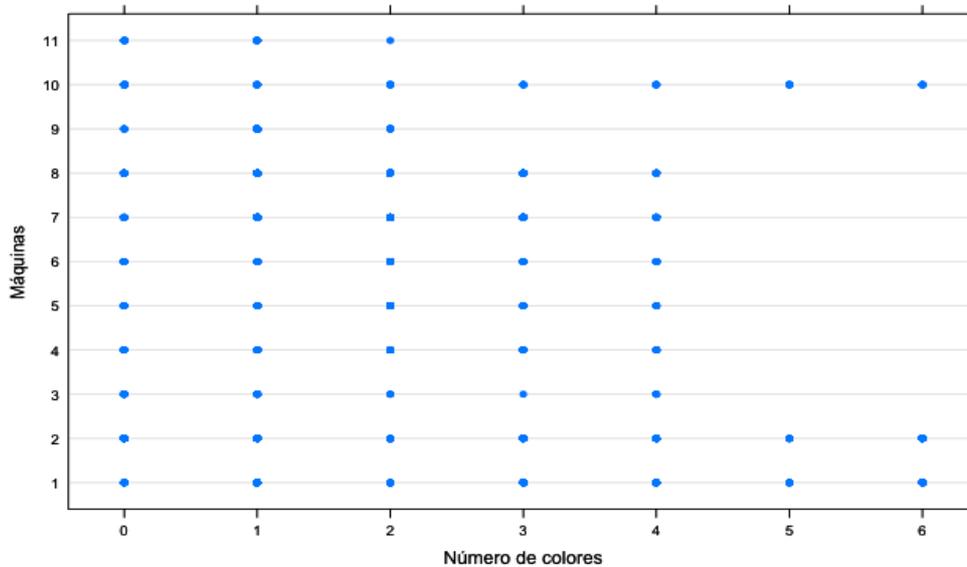
En la siguiente gráfica, que muestra la cantidad de pedidos que se realizan por máquina, podemos observar que la máquina 8 es la que más pedidos procesa con un 24.1% del total.

Porcentajes de pedidos por máquinas



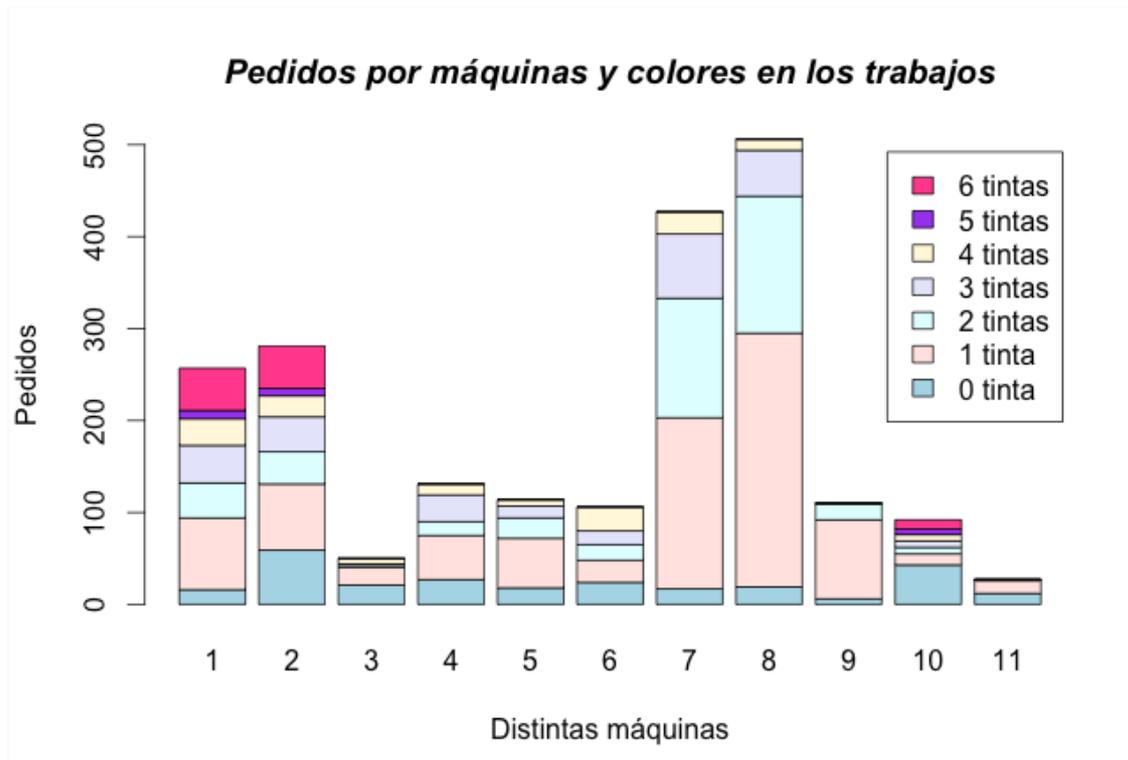
En el gráfico que muestro a continuación podemos ver la cantidad de tintas que utiliza cada máquina en los procesos de fabricación de los pedidos. Observamos cómo las máquinas 1, 2 y 10 pueden utilizar hasta 6 tintas distintas.

Gráfico de número de colores en las máquinas



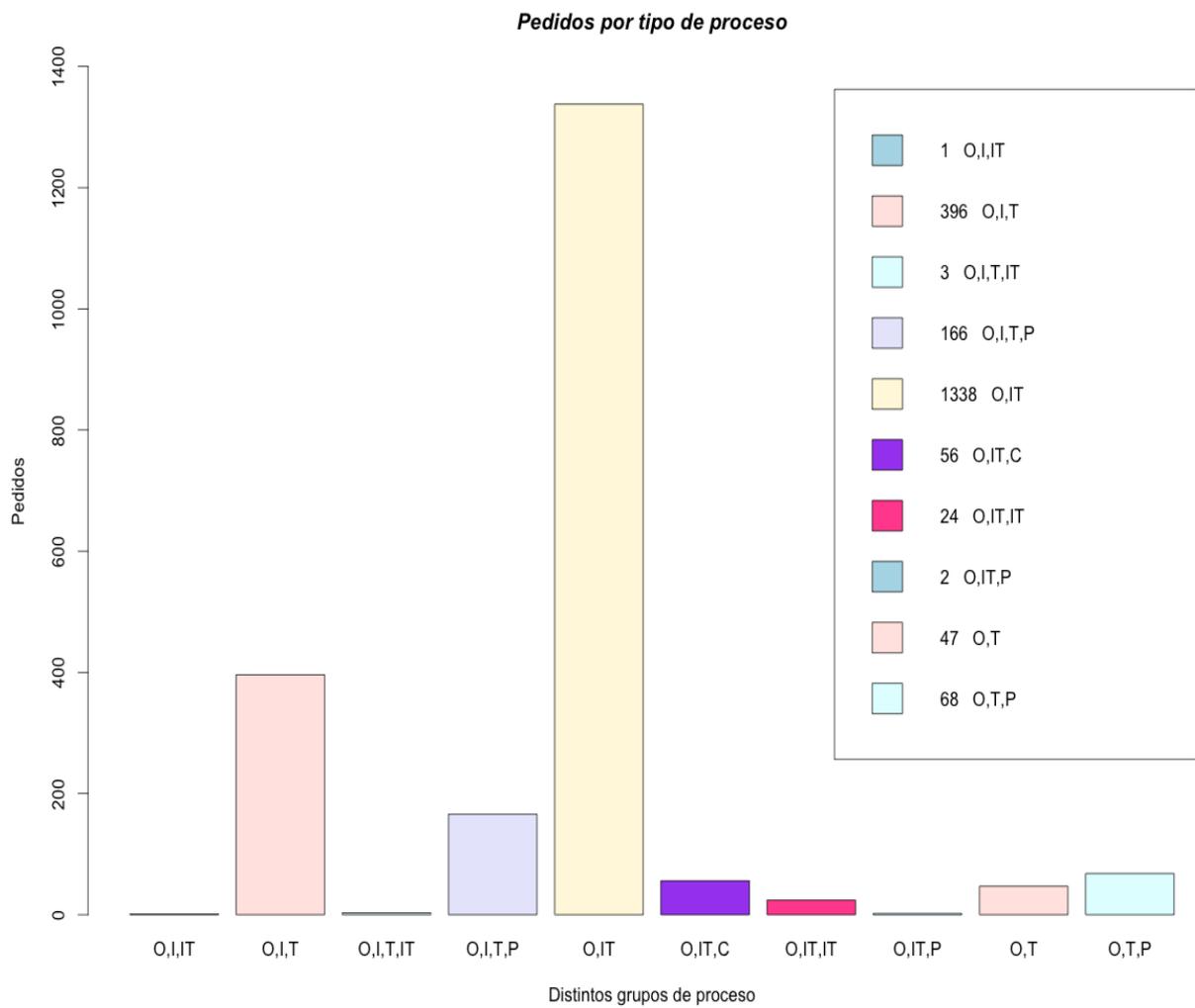
La siguiente gráfica es un compendio de las anteriores. En ella he reunido información sobre el número de tintas en los pedidos, la cantidad de pedidos por máquinas y el número de colores que se utilizan en cada máquina.

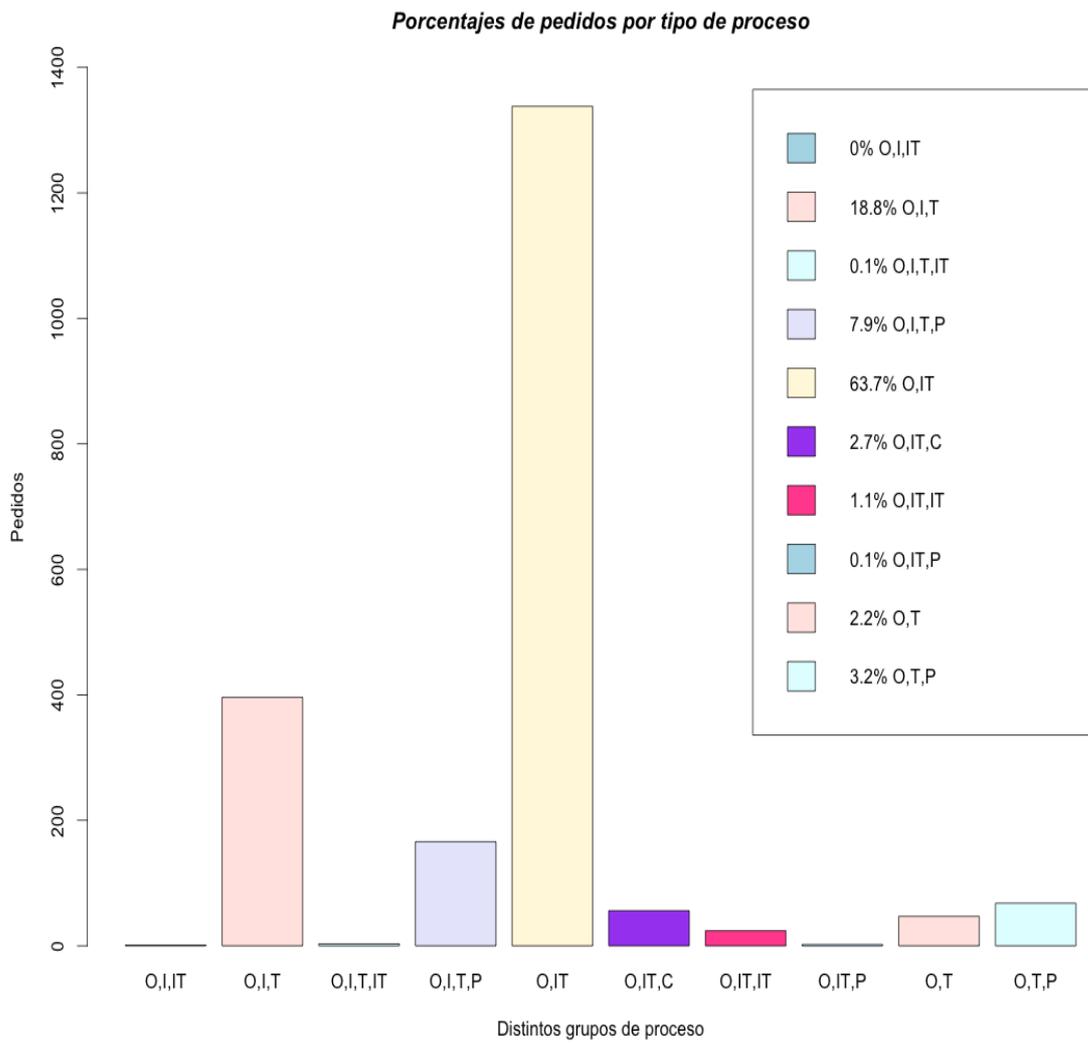
Si nos fijamos en la máquina 8, que es la que más pedidos procesa, vemos que sólo realiza trabajos con 0, 1, 2, 3 y 4 tintas y que en la mayoría de trabajos se han empleado sólo 1 tinta.



A continuación estudié la cantidad de pedidos atendiendo a los tipos de procesos utilizados en su fabricación.

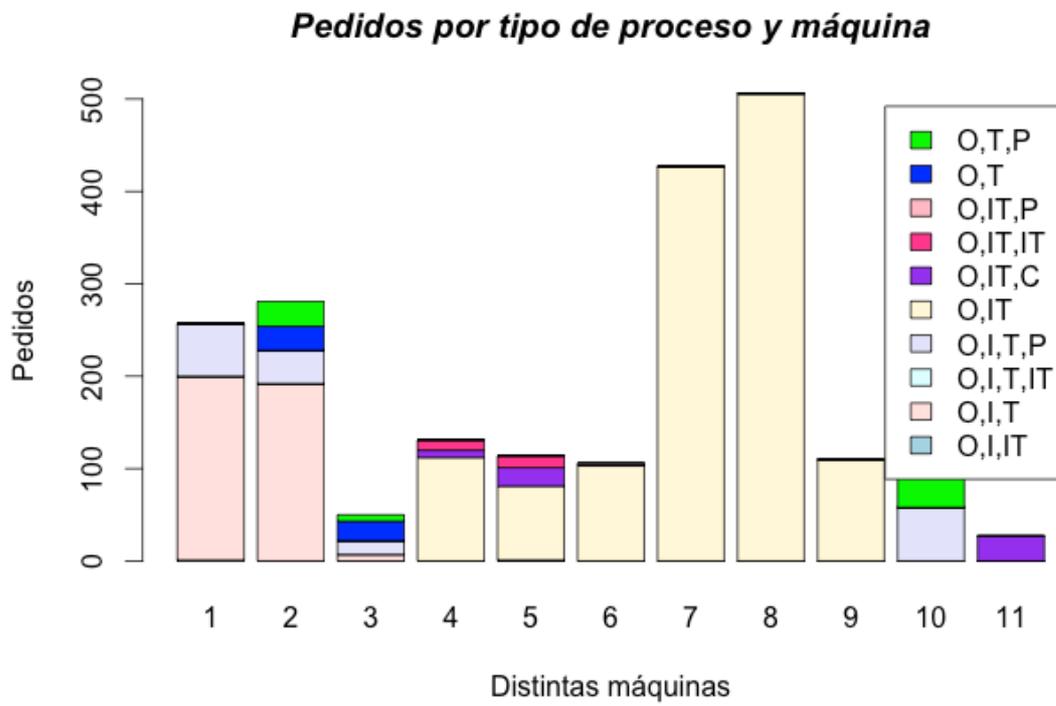
(Siendo: O onduladora, I impresión, T troquelado, P pegado)



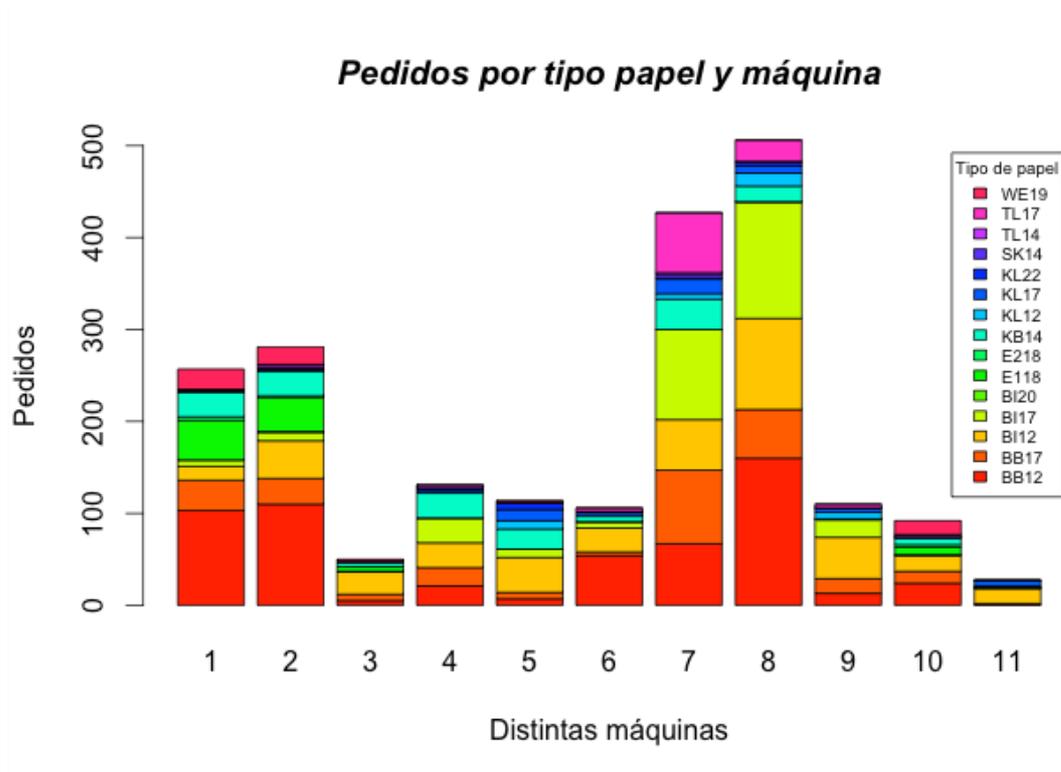


Vemos que la mayoría de pedidos (un 63.7%) son fabricados mediante el grupo de proceso [O, IT].

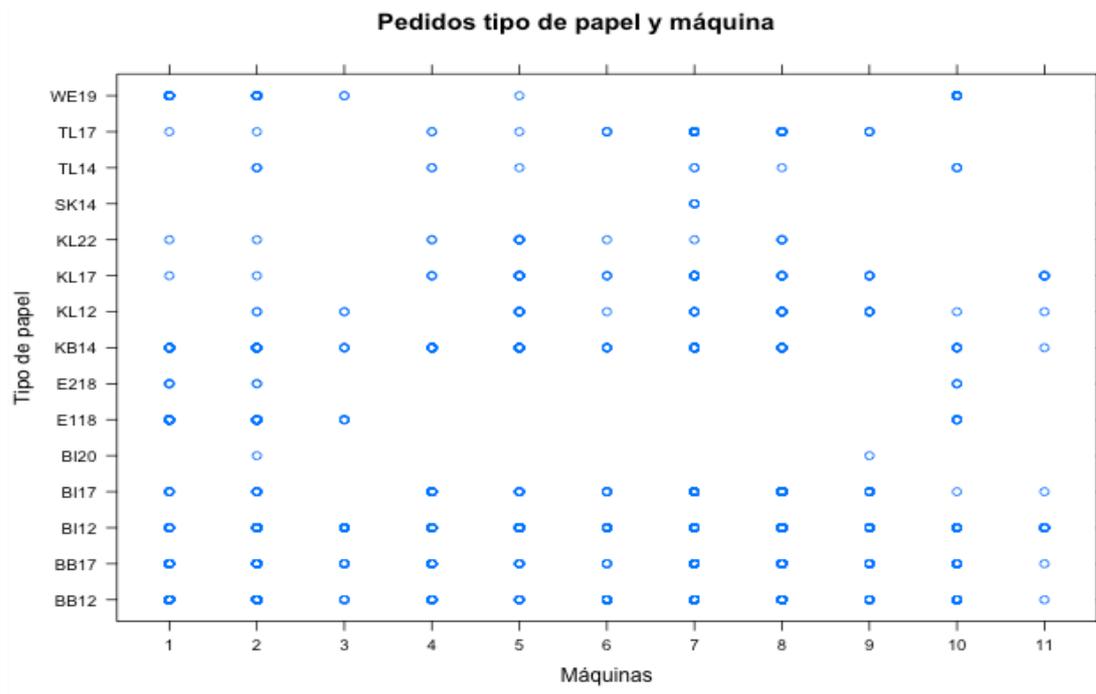
Seguidamente podemos comprobar cómo se relacionan los tipos de procesos con las distintas máquinas.



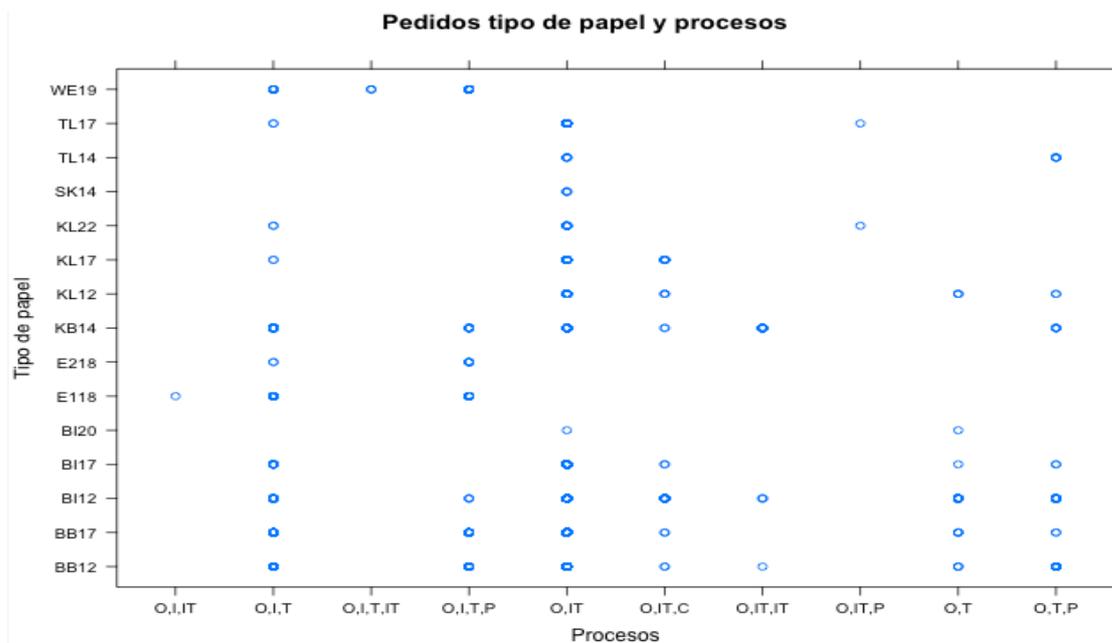
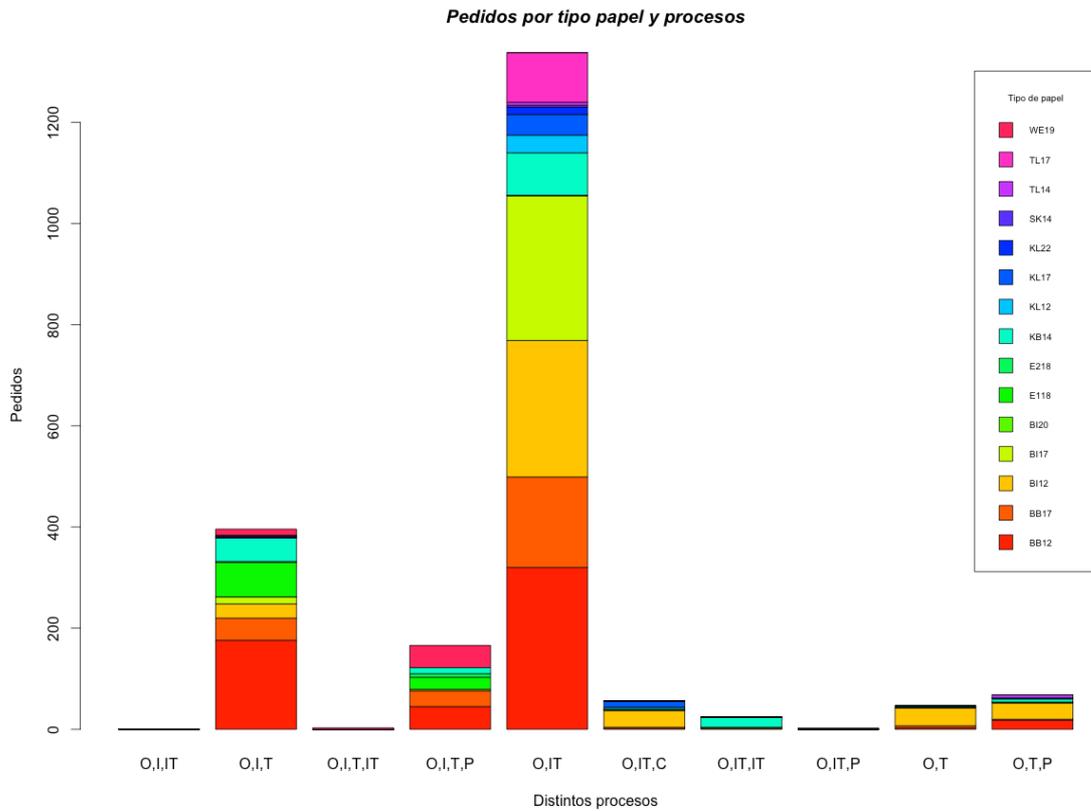
En el siguiente gráfico muestro la cantidad de pedidos dependiendo del tipo de papel que utilizan las diferentes máquinas.



De manera más esquemática también he tratado de mostrar los tipos de papel que utiliza cada máquina. A continuación podemos comprobar cómo la máquina 2 utiliza 14 de los 15 tipos de papel.

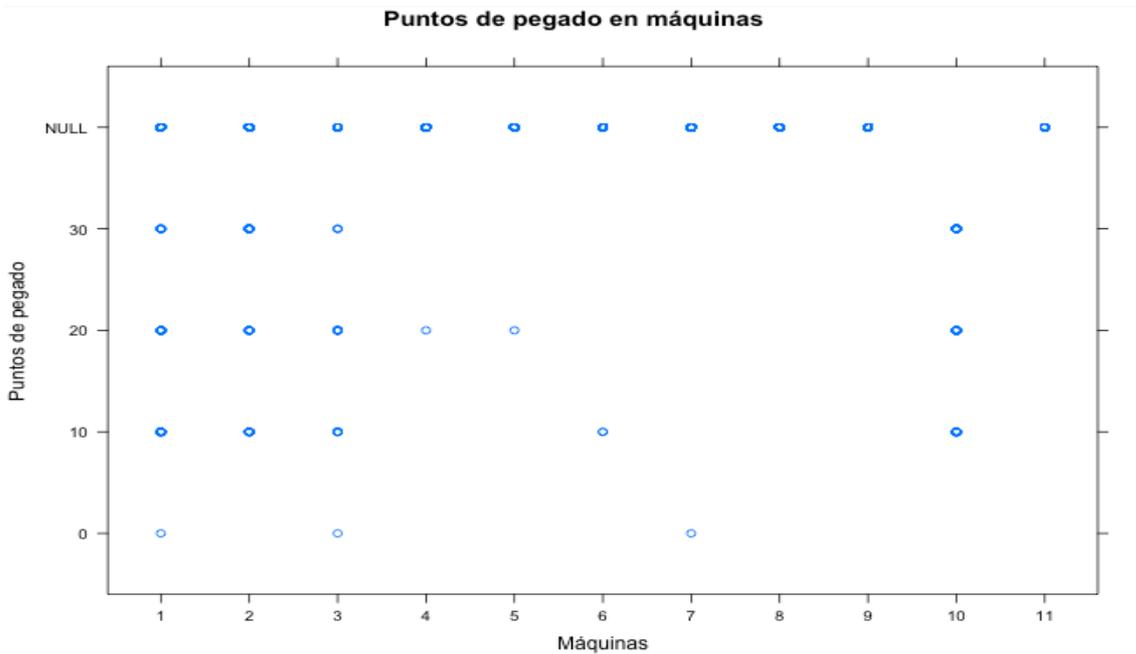


Por otro lado, la cantidad de pedidos por tipos de papel empleado y grupos de procesos utilizados en su fabricación se muestran de la siguiente forma.

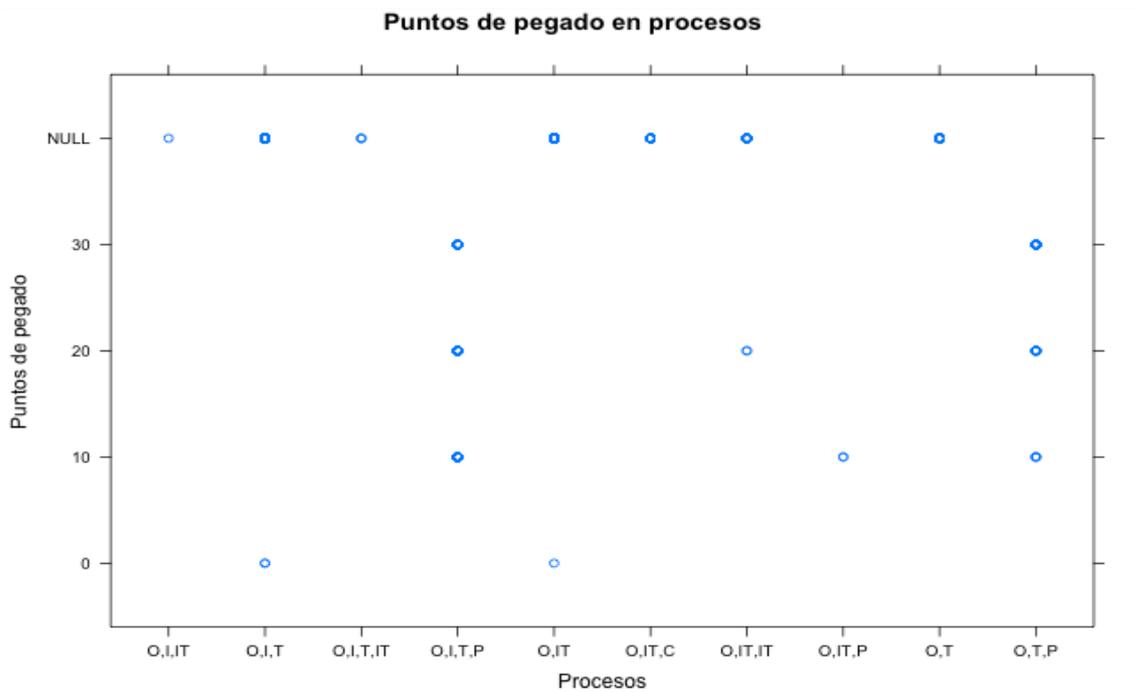


Vemos que el grupo de procesos [O,IT], además de ser el que más pedidos produce, usa más tipos de papel en la fabricación de pedidos.

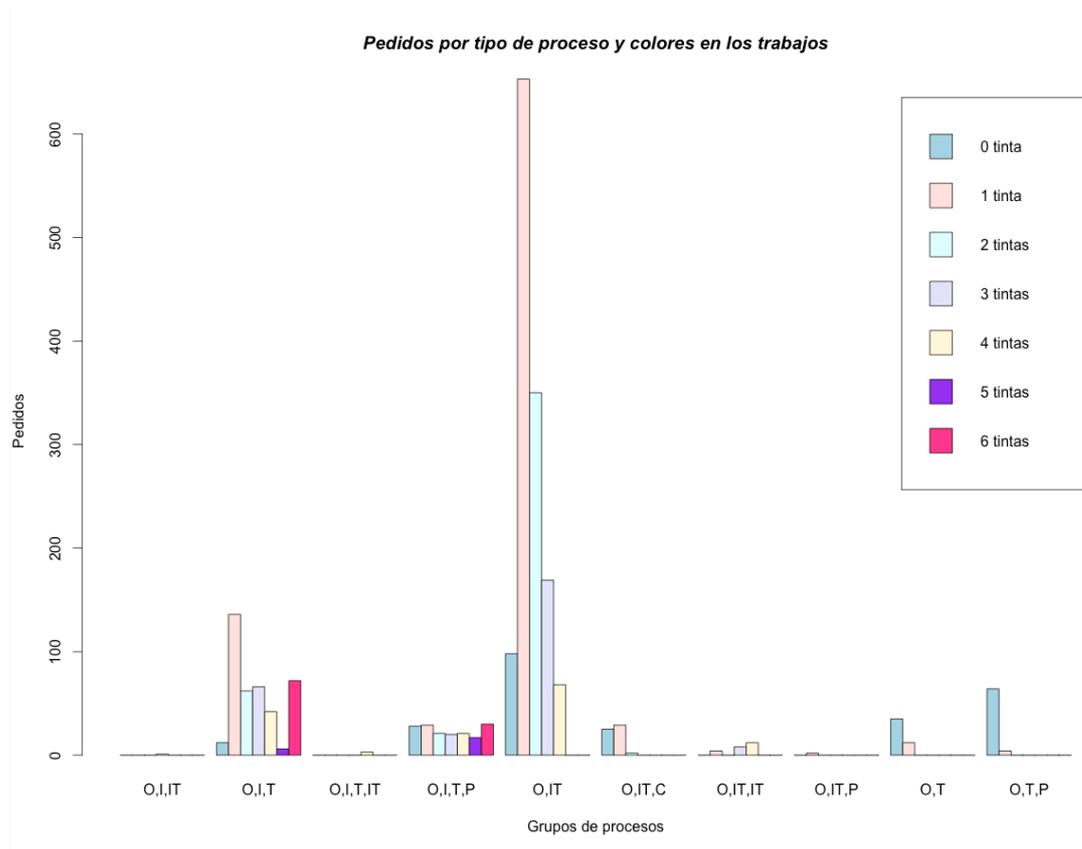
A continuación estudié los puntos de pegado que se realizan en cada una de las máquinas y podemos comprobar cómo la máquina 1 es la que realiza más puntos de pegado.



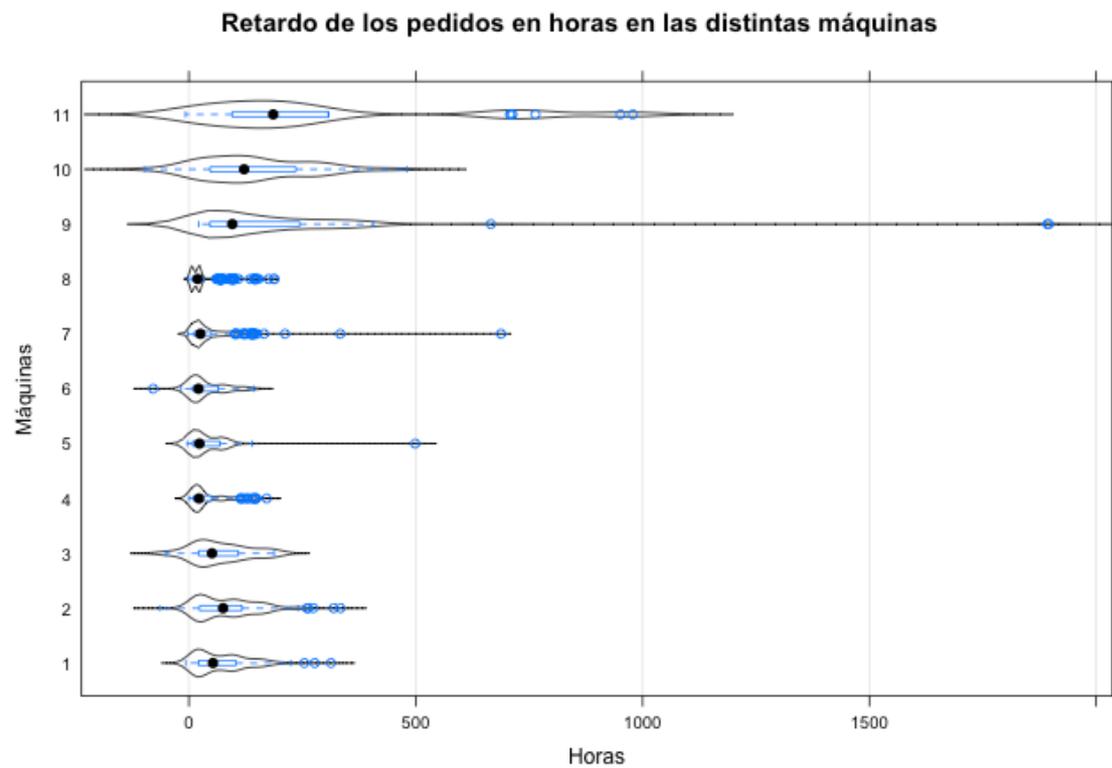
Estudiamos los puntos de pegado en relación con los procesos y vemos que para el grupo de procesos [O,I,T,P] se realizan más puntos de pegado en los pedidos.



A modo de resumen, en la siguiente gráfica se muestra la cantidad de pedidos fabricados dependiendo del tipo de proceso y número de colores empleados. Vemos cómo hay mayor número de pedidos con 1 tinta fabricados mediante el grupo de proceso [O,IT].

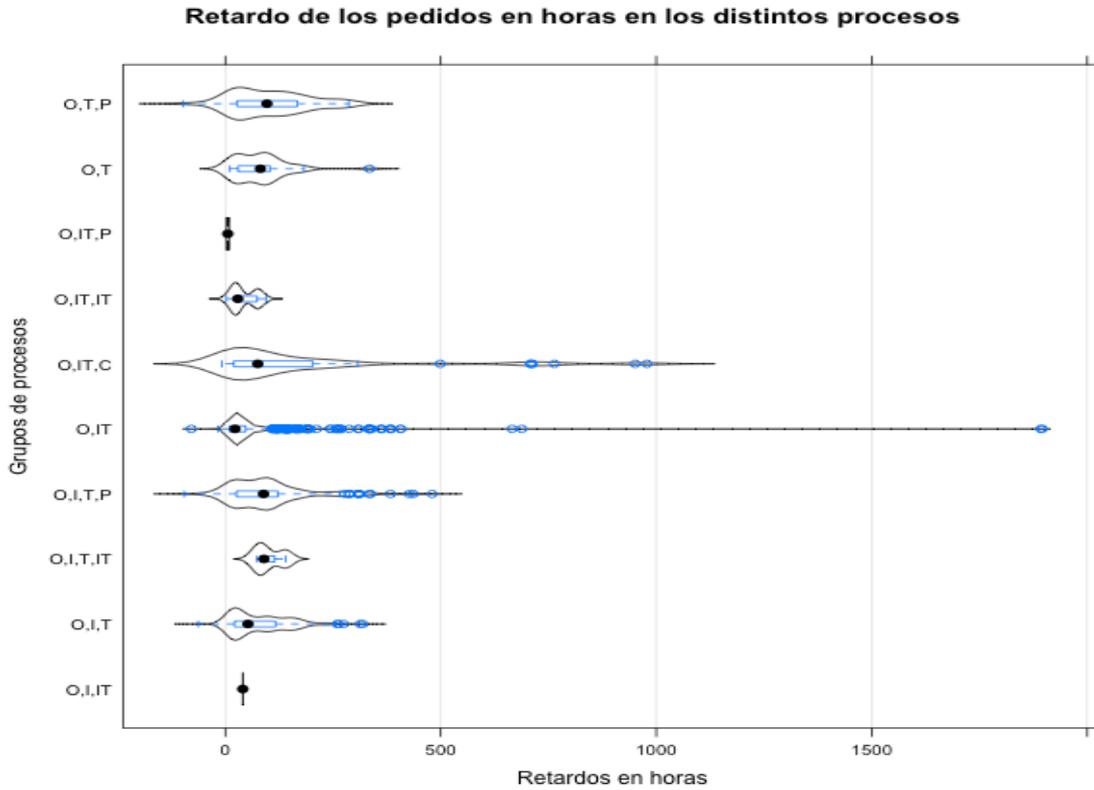


A continuación, estudié los retardos que se producen en los pedidos, relacionándolos con las máquinas y con los tipos de procesos.

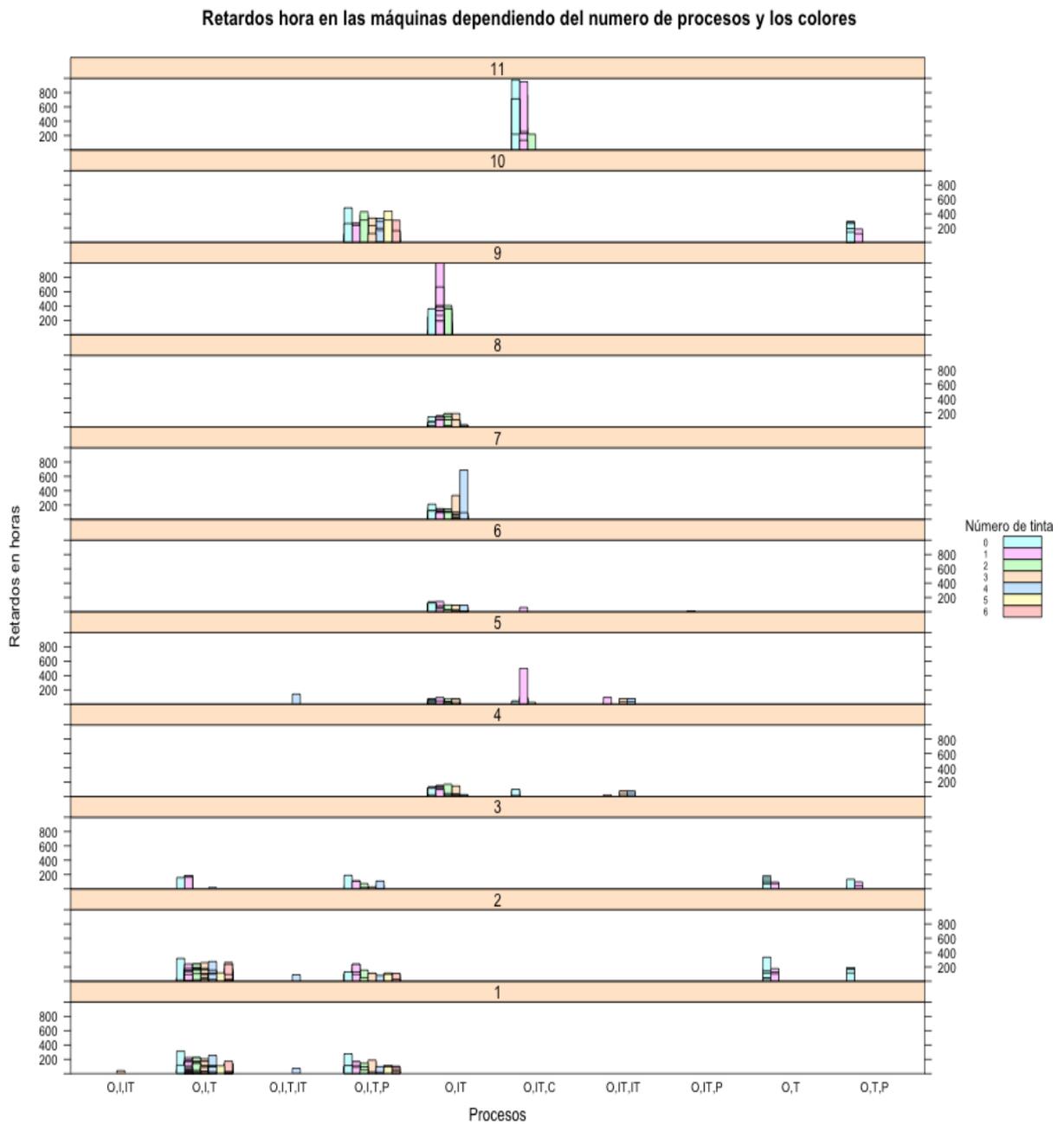


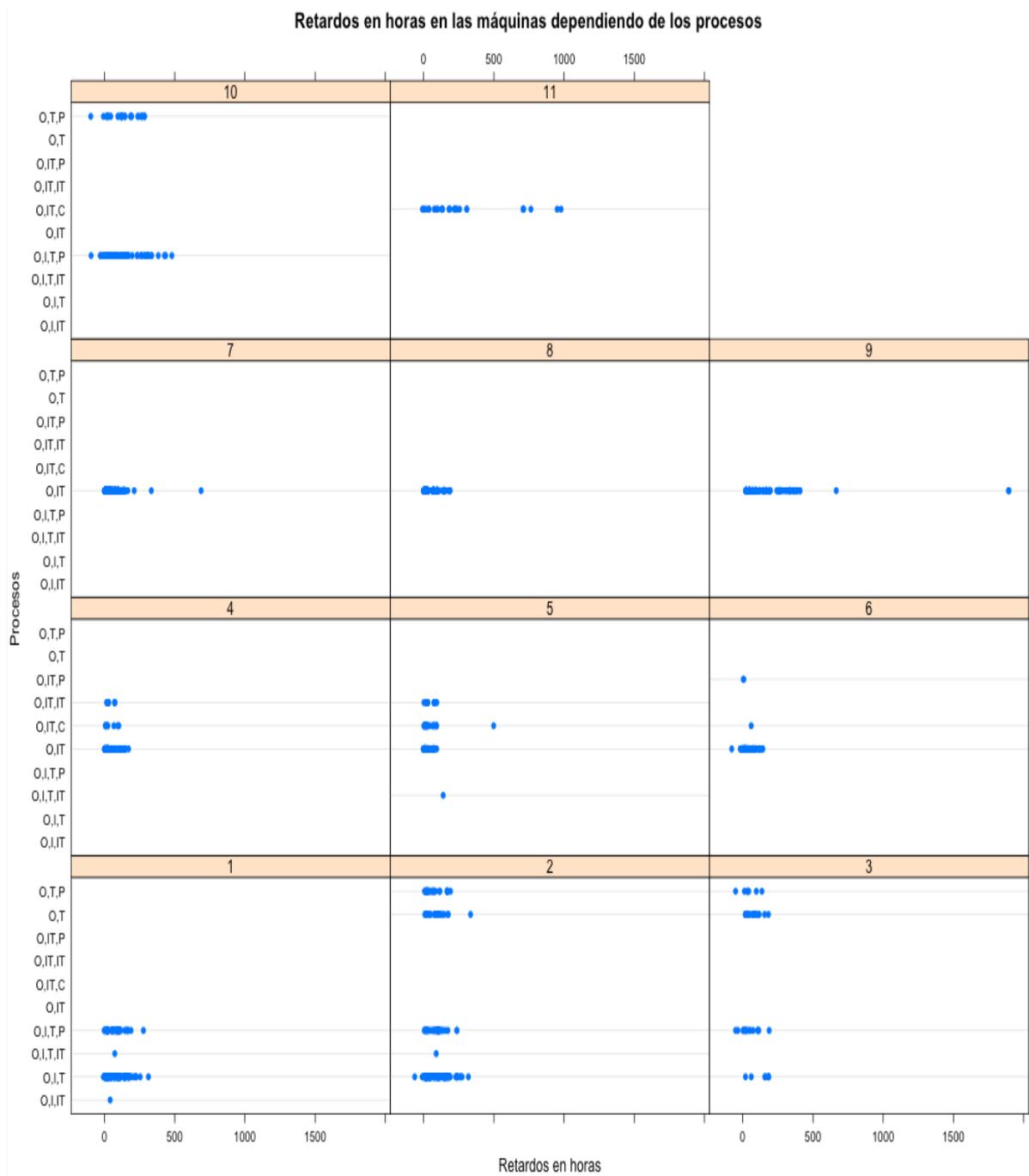
Podemos advertir cómo se distribuyen los retardos en las distintas máquinas y apreciar que en la máquina 9 se produjo el mayor retardo.

Respecto a los procesos, el grupo de procesos [O,IT,P] es el que tiene menos retardos.



A modo de resumen de lo anterior, las siguientes gráficas relacionan los retardos de los pedidos con las máquinas, los grupos de procesos y el número de colores empleados en la fabricación.





Anteriormente descubríamos que donde se producían menos retardos era en el grupo de procesos [O,IT,P] y en la gráfica anterior podemos apreciar que estos sólo se dan en la máquina 6 para este grupo de procesos.

Aunando toda la información que se desprende del análisis descriptivo podemos decir que la mayoría de los pedidos se procesan en la máquina 8 utilizan 1 tinta y se fabrican mediante el grupo de procesos [O,IT]. Por otro lado, también podemos apuntar que la máquina que utiliza más tipos de papel es la 2 y que se realizan más puntos de pegado con la máquina 1 y el grupo de procesos [O,I,T,P]. También cabe destacar que las máquinas 1, 2 y 10 utilizan 6 tintas distintas. Respecto a los procesos, encontramos que el grupo [O,IT] además de ser el que más pedidos produce, es el que más tipos de papel usa en la fabricación de pedidos. El grupo de procesos que más puntos de pegado realiza es el [O, I, T, P] y el que menos retardos tiene es el [O, IT,P], producidos en la máquina 6. Por último, podemos comentar que la máquina con mayores retardos es la máquina 9.

2.5.2 Simulación simple en la muestra original.

El siguiente paso es estudiar el comportamiento del sistema. Para ello se hacen supuestos sobre su operación, que usualmente toman la forma de relaciones matemáticas o lógicas y constituyen el modelo que es usado para tratar de entender cómo se comporta el sistema.

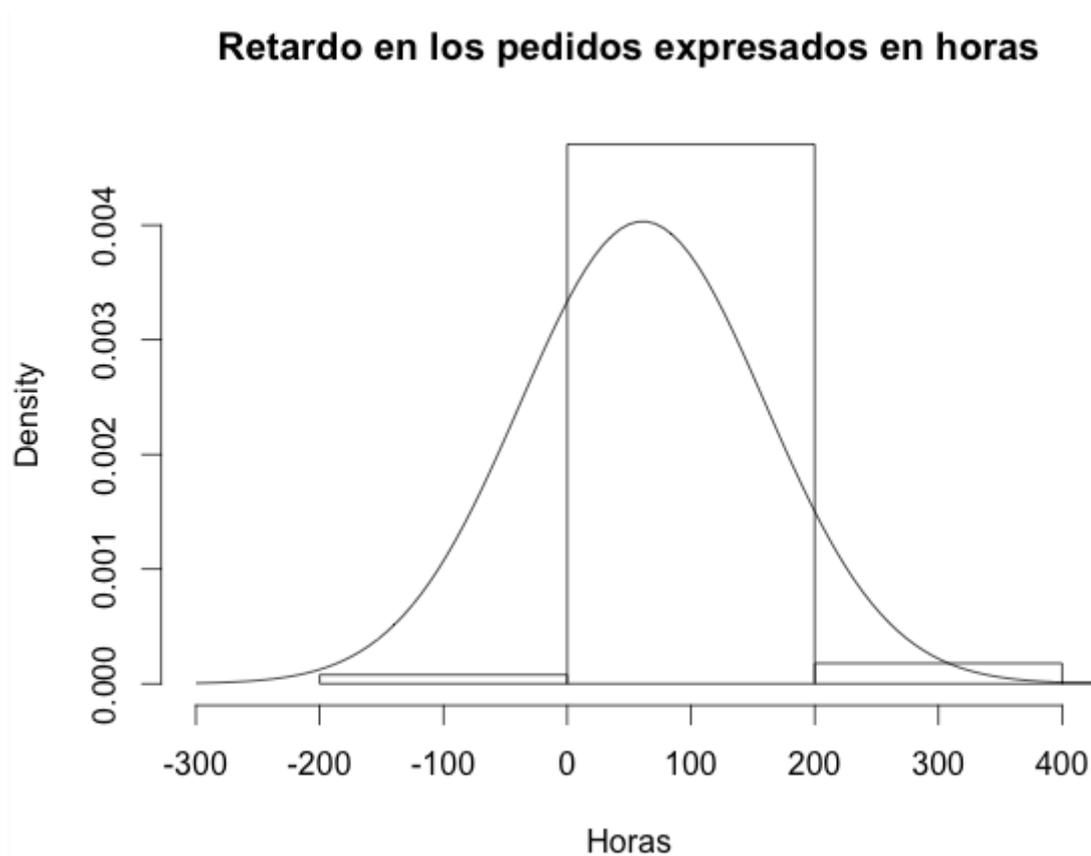
En algunos casos las relaciones que componen un modelo son lo suficientemente sencillas como para utilizar métodos matemáticos como el cálculo, el álgebra o la teoría probabilística. Estos métodos matemáticos ayudan a obtener información exacta sobre aspectos de interés, lo que se conoce como soluciones analíticas. Sin embargo, la mayoría de los sistemas reales son demasiado complejos para ser evaluados analíticamente, por lo que estos modelos tienen que ser estudiados mediante la simulación estadística.

Con la simulación se imita el comportamiento de uno o varios procesos del sistema presentándolos ante diversos escenarios y estimando sus características sin necesidad de llevarlos a cabo en el sistema real. Esto permite comparar diferentes alternativas evaluadas y seleccionar la que presente mejores resultados.

En este ejemplo de aplicación usamos las posibilidades que brinda la simulación en el manejo de problemas no tratables mediante programación lineal entera.

A continuación expondré un estudio exhaustivo de los retardos en los pedidos utilizando técnicas de simulación para generar valores aleatorios de los tiempos planificados y tiempos de fabricación para calcular los retardos en los pedidos y ver cómo se comportan.

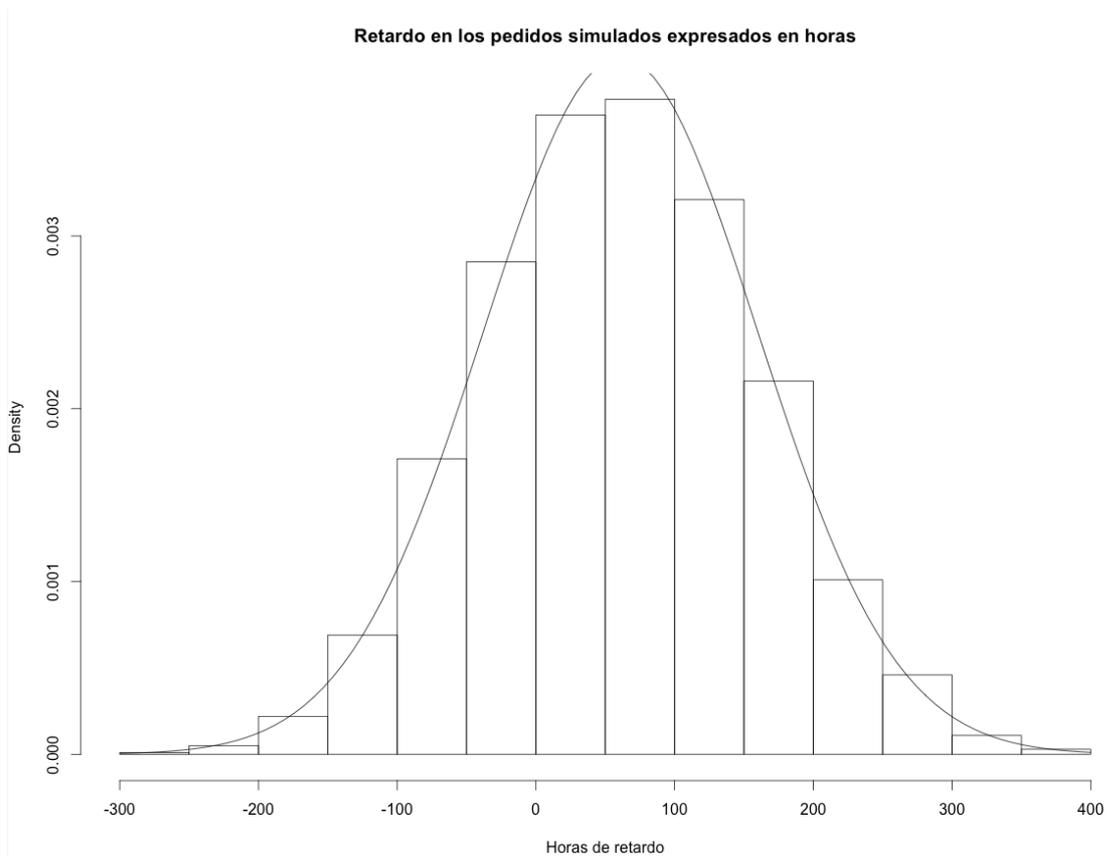
De este modo, si analizamos los retardos producidos en los pedidos con los datos originales, obtenemos la siguiente gráfica.



Media (Retardo en horas de los pedidos) = 61.04433.

Sd (Retardo en horas de los pedidos)= 98.90931.

A continuación generé 2.000 valores aleatorios que se distribuyeron como una normal con media y varianza igual a la muestral. Así obtuve la siguiente gráfica.



Media (Retardo en horas de los pedidos simulados) = 60.90953.

Sd (Retardo en horas de los pedidos simulados)= 99.04895.

En los datos originales de 2.101 pedidos encontré 2.068 con retardo. Esto implica a un 98.43% de los pedidos. Por otro lado, descubrí que 1.138 de los mismos tenían un retardo mayor que 24h.

Analizando los datos generados encontré que de 2.000 pedidos, había 1.447 que presentaban retardo, lo que supone un 72.35% de los pedidos. Por otro lado, 1.278 de estos tenían un retardo mayor que 24h.

Comprobé cómo la media de los retardos en horas de los datos generados es menor que la de los datos originales. Sin embargo, aunque la media de los retardos sea

menor, pude comprobar que para los datos generados hay más pedidos con retardos mayores de 24h.

2.5.3 Retardos producidos al ordenar los pedidos por máquinas.

Para ver de qué forma se ven afectados los retardos dependiendo en la máquina en la que son procesados, realicé un estudio de los retardos para las distintas máquinas. Para ello tuve que crear una tabla donde los pedidos estuvieran ordenados por máquinas. Para la secuencia de pedidos de cada una de ellas tuve que calcular los tiempos finales previstos atendiendo a los tiempos totales planificados que me ofrecía la muestra. También opté por calcular los tiempos finales de fabricación atendiendo a los tiempos totales de fabricación de la muestra, eliminando los tiempos muertos entre pedidos en las máquinas. Todo esto me permitió construir los retardos que se producían en cada máquina para las secuencias que ofrecía los datos.

A continuación muestro el resumen de las medias de retardos para las distintas máquinas.

	Retrasos medios por máquina
M1	214842.29
M2	93090.30
M3	52844.06
M4	395415.94
M5	234895.10
M6	173746.04
M7	333323.84
M8	270432.30
M9	482143.07
M10	31204.51
M11	89320.63

Así encontré que la máquina 9 es la que tiene mayor media de retardos (tal y como vimos en el análisis descriptivo) y que la máquina 10 es la que tiene menor media de retardos y menos pedidos tardíos.

2.5.4 Simulación múltiple en una muestra reducida.

Para elaborar un análisis más exhaustivo seleccioné en la máquina 8 los 10 primeros pedidos y analicé de qué forma afecta la ordenación de los pedidos en los retardos que se producen. Para ello realicé 5 ordenaciones distintas y estudié los retardos, los pedidos tardíos y los cambios de color en cada una de las ordenaciones para poder evaluarlo y encontrar la mejor secuencia, replicando de esta forma el proceso de manufactura real FJSP.

Las ordenaciones fueron las siguientes:

Ordenación 1: Seleccioné los 10 primeros pedidos de la máquina 8.

Ordenación 2: Consideré el orden inverso de los trabajos de la muestra anterior.

Ordenación 3: Permuté el trabajo 1 y 2 de la ordenación 1.

Ordenación 4: Coloqué los trabajos 5 y 6 los primeros en la ordenación 1.

Ordenación 5: Permuté los trabajos 2 y 3 de la ordenación 1.

Para cada ordenación calculé los tiempos planificados, los tiempos fabricados, los retardos de los pedidos y los promedios de retrasos, eliminando los tiempos muertos entre pedidos en las máquinas.

Esta sería la tabla resumen de la muestra de los 10 primeros trabajos de la máquina 8.

	Promedio de retrasos	Trabajos retrasados	Cambios.de.color
Ordenación 1	12092.8	7	5
Ordenación 2	16111.2	10	5
Ordenación 3	12069.9	7	5
Ordenación 4	13090.8	10	5
Ordenación 5	12183.6	8	6

Teniendo en cuenta el resumen anterior, podemos ver que la ordenación 3 es la que mejores resultados desprende al tener menor promedio de retrasos.

A continuación comprobé qué pasaría si en las ordenaciones anteriores se generaran aleatoriamente tiempos planificados de los pedidos mediante una normal con media y varianza de los tiempos planificados en la muestra original. También generé aleatoriamente tiempos de fabricación mediante una normal con media y varianza de los tiempos de fabricación de la muestra original.

Con los datos simulados calculé en cada una de las ordenaciones anteriores los tiempos planificados, los tiempos fabricados, los retrasos, los promedios de retrasos y los trabajos retrasados.

Obtuve la siguiente tabla resumen:

	Promedio de retrasos generados	Trabajos retrasados generados
Ordenación 1	14006.4289	10
Ordenación 2	785.4518	4
Ordenación 3	14134.6941	10
Ordenación 4	13627.3473	10
Ordenación 5	14243.5279	10

En la siguiente tabla muestro un resumen de los resultados de los datos originales y los datos simulados:

	Media retrasos	Trabajos tardíos	Media retrasos.g	Trabajos tardíos.g	Cambios de color
Ordenación 1	12092.8	7	14006.4289	10	5
Ordenación 2	16111.2	10	785.4518	4	5
Ordenación 3	12069.9	7	14134.6941	10	5
Ordenación 4	13090.8	10	13627.3473	10	5
Ordenación 5	12183.6	8	14243.5279	10	6

Podemos comprobar que en general, los datos simulados producen más trabajos tardíos, excepto en la ordenación 2 donde sólo hay 4 trabajos retrasados y la media de retrasos es considerablemente menor que las demás.

Repetimos el proceso de simulación 15 veces en cada ordenación y analizamos los datos.

El resumen de las 15 simulaciones en las 5 ordenaciones lo encontramos en la siguiente tabla:

	PR 0.1	TR 0.1	PR 0.2	TR 0.2	PR 0.3	TR 0.3	PR 0.4	TR 0.4	PR 0.5	TR 0.5
Simulación 1	14006.429	10	785.4518	4	14134.694	10	13627.347	10	14243.528	10
Simulación 2	16118.076	10	12017.3383	10	15477.191	9	13949.430	10	17151.500	10
Simulación 3	11564.460	10	4495.8808	8	10580.447	9	9987.243	10	11297.507	10
Simulación 4	32230.790	10	26488.8029	9	32596.090	10	30563.677	10	32623.273	10
Simulación 5	21466.821	10	24738.6595	10	21945.227	10	24194.732	10	20301.710	10
Simulación 6	16734.161	10	23613.9557	10	16056.333	10	19254.301	10	16135.614	10
Simulación 7	16315.592	10	8174.5397	9	15868.594	10	13567.167	8	15970.659	10
Simulación 8	5893.185	8	11576.5377	10	5748.774	8	5392.876	8	6751.689	9
Simulación 9	15070.306	10	13058.7643	10	15547.005	10	15893.757	10	14731.129	10
Simulación 10	10519.963	10	4801.9906	10	10476.796	10	8930.785	9	10321.866	10
Simulación 11	24692.435	10	24237.0236	10	24215.360	10	22282.828	10	24038.411	10
Simulación 12	5080.161	8	11076.5542	10	3960.360	7	7373.209	10	5638.142	9
Simulación 13	30925.532	10	22689.5607	9	30281.460	10	31905.304	10	31039.833	10
Simulación 14	21955.233	10	20634.0752	10	22316.465	10	20993.676	10	22014.032	10
Simulación 15	25334.603	10	22754.3970	10	24908.064	10	19590.743	9	25413.601	10

Cuando aparece PR estoy haciendo referencia al promedio de retaso y con TR me refiero al número de trabajos retrasados en cada una de las 5 ordenaciones planteadas.

Para hacer una comparación de los resultados mostré los valores obtenidos en una tabla en la que para cada ordenación, tras 15 simulaciones, indico el promedio de retardo, la media de trabajos retrasados, el mejor valor de retardo (mínimo) y el peor valor de retardo (máximo).

Estos fueron los valores obtenidos de las 15 simulaciones en cada ordenación:

Ordenación	Promedio R	Promedio TR	Mejor	Peor
Ordenación 1	17860.52	9.733333	5080.1606	32230.79
Ordenación 2	15409.57	9.266667	785.4518	26488.80
Ordenación 3	17607.52	9.533333	3960.3596	32596.09
Ordenación 4	17167.14	9.600000	5392.8762	31905.30
Ordenación 5	17844.83	9.866667	5638.1422	32623.27

Como vemos, la ordenación 2 (en la que utilizamos el orden inverso de los diez primeros pedidos de la máquina 8) es la que mejores resultados desprende, ya que tiene un menor promedio de retardo, una menor media de trabajos retrasados, un

valor mínimo de los retardos de todas las ordenaciones y el máximo retardo más pequeño de todos.

2.5.5 Análisis de resultados.

Tras realizar el análisis descriptivo de los datos para tratar de entender cómo se relacionan las variables en el proceso de producción de la fabricación de cajas de cartón, podemos advertir que la mayoría de pedidos se procesan en la máquina 8 (21%) y que el 41% de los pedidos se fabrican con una sola tinta. Además, el grupo de procesos que más pedidos genera es el grupo [O, IT] con un 63,7% de la producción total. Respecto a los retardos, comprobé que la máquina 9 es la que mayores retardos tiene y que el grupo de procesos [O,IT,P] no tiene prácticamente retardos.

Para estudiar el comportamiento del sistema de producción hice uso de las ventajas que proporciona la simulación en el manejo de problemas no tratables mediante programación lineal entera. Para ello simulé datos mediante una normal en relación con los tiempos de planificación y los tiempos de fabricación, dirigiendo mi estudio en los retardos y los trabajos tardíos. Tras esto pude comprobar que la media de retardos en los datos originales era mayor que la de los datos generados, pero la cantidad de pedidos con retardo mayor a 24h en los datos originales era menor que en la de los datos generados.

Luego me centré en estudiar los pedidos respecto a las máquinas, por lo que hice una ordenación de la muestra y recalculé los retardos que se producen para esa ordenación. Así pude comprobar que la máquina 9 es la que mayor media de retardos presentaba y que la máquina 10 tenía una menor media de retardos.

Para hacer un análisis profundo sobre cómo afectan las ordenaciones de los pedidos en los retardos producidos y en el número de trabajos tardíos, seleccioné 10 pedidos de la máquina 8 y generé 5 ordenaciones distintas. Así obtuve como resultado que la

ordenación 3 (donde se permuta el trabajo 1 y 2 de la selección inicial) era la que mejores resultados desprendía ya que ofrecía la menor media de retardos.

Al simular los tiempos planificados y tiempos de fabricación en las 5 ordenaciones consideradas, encontré que los resultados variaban. De esta forma comprobé que la ordenación 2 (donde se considera el orden inverso de los trabajos de la muestra inicial) era la que obtenía mejores resultados, presentando una media de retardos considerablemente menor y casi la mitad de trabajos tardíos en comparación con el resto de las ordenaciones.

Repetí el proceso de simulación 15 veces en cada ordenación para evaluar y encontrar la mejor secuencia de los trabajos y obtuve los mismos resultados: la ordenación 2 ofrecía un menor promedio de retardo, una menor media de trabajos retrasados, un valor mínimo de los retardos de todas las ordenaciones y el máximo retardo más pequeño de todos.

3. CONCLUSIONES.

En el caso de procesos de manufactura reales como el de las cajas de cartón, puedo asegurar que la simulación permite evaluar el sistema cuando contamos con datos que no son tratables mediante programación lineal entera, ya que esta es una técnica muy poderosa y ampliamente usada en las ciencias para analizar y estudiar sistemas complejos.

Las herramientas de simulación son una valiosa ayuda para la optimización de procesos. El esfuerzo analítico requerido para el modelado² contribuye a comprender en profundidad el funcionamiento del sistema real. También puedo apuntar que, una vez finalizado el proceso de simulación, es posible obtener una información muy relevante sobre el impacto de las posibles modificaciones en el sistema real.

Basándome en los resultados experimentales mostrados, puedo afirmar que el desempeño del sistema mejoraría si se gestionara adecuadamente la ordenación de los pedidos en las diferentes máquinas.

²El modelado es el proceso de abstracción por el que se obtienen las características de interés de un sistema.

La simulación de procesos no es algo novedoso, pero con las mejoras que actualmente se han producido a nivel de software y de hardware, las oportunidades que proporcionan en la actualidad este tipo de herramientas es considerable, ya que ofrecen un potencial enorme de cara a la mejora de todo tipo de sistemas reales.

4. ANEXOS CÓDIGO R.

A continuación muestro el código R utilizado en la creación del mapa de flujo, código que me ha permitido realizar el análisis descriptivo y el tratamiento de datos.

4.1 Anexo 1: Código R del VSM de una industria de fabricación de cajas de cartón:

```
install.packages("SixSigma")
library(SixSigma)

inputs <- c("Bobinas de papel")
outputs <- c("Cajas de cartón ondulado")
steps <- c("CORRUGADORA", "IMPRESION", "TROQUELADO",
           "PLEGADO Y PEGADO", "FLEJADO Y PALETIZADO")
io <- list()
io[[1]] <- list("Onduladora de papel", "Encolado",
               "Mesas calientes", "Cortadoras", "Separadoras")
io[[2]] <- list("Flexografía")
io[[3]] <- list("Troquelado plano", "Troquelado rotativo")
io[[4]] <- list("")
io[[5]] <- list("")

param <- list()
param[[1]] <- list(c("Cola", "P"),
                  c("Temperatura", "Cr"),
                  c("Gramaje del papel", "C"),
                  c("Presión", "Cr"))
param[[2]] <- list(c("Cantidad de tintes", "Cr"),
                  c("Clichés", "P"))
param[[3]] <- list(c("Presión", "Cr"))
param[[4]] <- list(c("Cola", "P"),
                  c("Presión", "Cr"))
param[[5]] <- list(c("Presión", "Cr"))

feat <- list()
feat[[1]] <- list("Longitud", "Peso", "Forma")
feat[[2]] <- list("Diseño")
feat[[3]] <- list("Forma", "Corte")
feat[[4]] <- list("Acabado")
feat[[5]] <- list("Empaquetado")

ss.pMap(steps, inputs, outputs, io, param, feat,
        sub="", main="Elaboración de cajas de cartón")
```

4.2 Anexo 2: Código R del análisis descriptivo:

```
##### ANALISIS DESCRIPTIVO DE LOS DATOS #####
####
require(gdata)
Datos<-read.xls ("DatosTFG.xlsx")
install.packages("lubridate")
library(lubridate)
library(lattice)

##### PEDIDOS POR NÚMERO DE COLORES #####
####
table(Datos$NUM_COLORES)
plotlabelsproc2<- paste(table(Datos$NUM_COLORES)," ",
                           names.argC=c("0 tinta","1 tinta","2 tintas", "3 tintas",
                                           "4 tintas","5 tintas", "6 tintas"))
barplot(table(Datos$NUM_COLORES),
        col = c("lightblue", "mistyrose", "lightcyan",
                "lavender", "cornsilk","purple","violetred1"),
        legend = rownames(Datos$NUM_COLORES), ylim = c(0, 1000),xlab="Número de colores",
        ylab= "Pedidos",
        main = "Pedidos por el número de colores",
        font.main = 4,font.sub = 3,legend.text = plotlabelsproc2)

#### la misma pero con porcentajes colores-pedidos
percentlabels<- round(100*table(Datos$NUM_COLORES)/sum(table(Datos$NUM_COLORES)), 1)
plotlabels<- paste(percentlabels, "%", sep=" ", " ",
                   names.argC=c("0 tinta","1 tinta","2 tintas", "3 tintas", "4 tintas",
                                   "5 tintas", "6 tintas"))
barplot(table(Datos$NUM_COLORES),
        col = c("lightblue", "mistyrose", "lightcyan",
                "lavender", "cornsilk","purple","violetred1"),
        legend = rownames(Datos$NUM_COLORES), ylim = c(0, 1000),xlab="Número de colores",
        ylab= "Pedidos",
        main = "Porcentajes de pedidos por número de colores", font.main = 4, font.sub = 3,
        legend.text = plotlabels)

####
##### Diagrama de sectores con porcentajes colores-pedidos
percentlabels<- round(100*table(Datos$NUM_COLORES)/sum(table(Datos$NUM_COLORES)), 1)
pielabels<- paste(percentlabels, "%", sep="")
pie(table(Datos$NUM_COLORES),col = c("lightblue", "mistyrose", "lightcyan",
                                     "lavender", "cornsilk","purple","violetred1"),
    names<-pielabels,main = "Porcentajes de pedidos por número de colores", font.main = 4)
legend("topright", c("0 tintas", "1 tinta", "2 tintas",
                    "3 tintas", "4 tintas", "5 tintas","6 tintas"), cex=0.8,
    fill=c("lightblue", "mistyrose", "lightcyan",
           "lavender", "cornsilk","purple","violetred1"))
```

```
##### PEDIDOS POR MAQUINAS #####
table(Datos$MqFabr)
percentlabelsmaq<- round(100*table(Datos$MqFabr)/sum(table(Datos$MqFabr)), 1)
plotlabelsmaq<- paste(percentlabelsmaq , "%", sep="")
barplot(table(Datos$MqFabr),col = rainbow(11),
        legend = rownames(Datos$MqFabr), ylim = c(0, 550),
        main = "Porcentajes de pedidos por máquinas", font.main = 4,xlab="Máquinas", ylab="Pedidos",
        font.sub = 3,legend.text = plotlabelsmaq)

### Colores en máquinas
dotplot( MqFabr ~NUM_COLORES , data = Datos, xlab="Número de colores", ylab= "Máquinas",
        main="Gráfico de número de colores en las máquinas")

##### Pedidos por máquina y color #####
table(Datos$NUM_COLORES, Datos$MqFabr)
count <- table(Datos$NUM_COLORES, Datos$MqFabr)
names.argC=c("0 tinta","1 tinta","2 tintas", "3 tintas", "4 tintas","5 tintas", "6 tintas")
barplot(count,col = c("lightblue", "mistyrose", "lightcyan",
                    "lavender", "cornsilk","purple","violetred1"),
        main = "Pedidos por máquinas y colores en los trabajos",
        font.main = 4,legend = rownames(Datos$NUM_COLORES),
        legend.text =names.argC,xlab="Distintas máquinas",ylab= "Pedidos",
        font.sub = 3, beside=F)

##### Pedidos por tipo de proceso #####
table(Datos$PROCESO_MAQUINAS)
plotlabelsproc3<- paste(table(Datos$PROCESO_MAQUINAS), " ",
                        names.arg=c("0,I,IT", "0,I,T", "0,I,T,IT", "0,I,T,P", "0,IT",
                                    "0,IT,C", "0,IT,IT", "0,IT,P", "0,T", "0,T,P"))
barplot(table(Datos$PROCESO_MAQUINAS),
        col = c("lightblue", "mistyrose", "lightcyan",
                "lavender", "cornsilk","purple","violetred1"),
        legend = rownames(Datos$PROCESO_MAQUINAS), ylim = c(0, 1400),
        main = "Pedidos por tipo de proceso", font.main = 4,xlab="Distintos grupos de proceso",
        font.sub = 3,legend.text =plotlabelsproc3 ,ylab="Pedidos")

##### Con porcentajes
percentlabelsproc<- round(100*table(Datos$PROCESO_MAQUINAS)/sum(table(Datos$PROCESO_MAQUINAS)), 1)
plotlabelsproc<- paste(percentlabelsproc , "%", sep=""," ",
                      names.arg=c("0,I,IT", "0,I,T", "0,I,T,IT", "0,I,T,P", "0,IT",
                                  "0,IT,C", "0,IT,IT", "0,IT,P", "0,T", "0,T,P"))
barplot(table(Datos$PROCESO_MAQUINAS),
        col = c("lightblue", "mistyrose", "lightcyan",
                "lavender", "cornsilk","purple","violetred1"),
        legend = rownames(Datos$PROCESO_MAQUINAS), ylim = c(0, 1400),ylab="Pedidos",
        main = "Porcentajes de pedidos por tipo de proceso", font.main = 4,
        xlab="Distintos grupos de proceso", font.sub = 3,legend.text = plotlabelsproc)

```

```

##### Pedidos por tipo de proceso y máquina #####
table(Datos$PROCESO_MAQUINAS, Datos$MqFabr)
count2 <- table(Datos$PROCESO_MAQUINAS, Datos$MqFabr)
names.argPM=c("0,I,IT", "0,I,T", "0,I,T,IT", "0,I,T,P", "0,IT",
              "0,IT,C", "0,IT,IT", "0,IT,P", "0,T", "0,T,P")
barplot(count2,col = c("lightblue", "mistyrose", "lightcyan",
                      "lavender", "cornsilk","purple","violetred1","pink","blue","green"),
        main = "Pedidos por tipo de proceso y máquina",
        font.main = 4,legend = rownames(Datos$PROCESO_MAQUINAS),
        legend.text =names.argPM,xlab="Distintas máquinas",ylab= "Pedidos",
        font.sub = 3, beside=F)

##### Pedidos por colores en tipos de proceso #####
table(Datos$NUM_COLORES, Datos$PROCESO_MAQUINAS)
count3 <- table(Datos$NUM_COLORES, Datos$PROCESO_MAQUINAS)
names.argPC=c("0 tinta","1 tinta","2 tintas", "3 tintas", "4 tintas","5 tintas", "6 tintas")
barplot(count3,col = c("lightblue", "mistyrose", "lightcyan",
                      "lavender", "cornsilk","purple","violetred1"),
        main = "Pedidos por tipo de proceso y colores en los trabajos",
        font.main = 4,legend = rownames(Datos$NUM_COLORES),
        legend.text =names.argPC,xlab="Grupos de procesos",ylab= "Pedidos",
        font.sub = 3, beside=T)

##### RETARDOS #####

###
### Retardos en máquinas
Datos$Retardo <-interval (Datos$FecPlanif , Datos$FecFabr)
Datos$Retardo <- as.duration(Datos$Retardo)
Datos$Retardo.horas <- Datos$Retardo/3600
Datos$Retardo.horas <- round(Datos$Retardo.horas, 2)
Datos$Retardo.horas <- as.duration(Datos$Retardo.horas)
sum(Datos$Retardo.horas)
mean(Datos$Retardo.horas)
sd(Datos$Retardo.horas)
min(Datos$Retardo.horas)
max(Datos$Retardo.horas)
range(Datos$Retardo.horas)
median(Datos$Retardo.horas)
length(Datos$Retardo.horas)
table(Datos$Retardo.horas)
plot(Datos$MqFabr, Datos$Retardo.horas,xlab="Máquinas", ylab="Retardo en horas",
     main="Retardos en horas en las distintas máquinas") # Retardos por máquinas

```

```

##### Retardo de los pedidos en horas en las distintas máquinas #####
dotplot( MaqFabr ~Retardo.horas , data = Datos, xlab="Retardos de los pedidos en horas", ylab= "Máquinas",
        main= "Gráfico de Retardos en horas de los pedidos en las máquinas")

#### El mismo más detallado ####
dotplot(MaqFabr~Retardo.horas, data=Datos,
        main="Retardo de los pedidos en horas en las distintas máquinas",
        xlab="Horas", ylab="Máquinas",
        panel = function(..., box.ratio) {
            panel.grid(h=0,v=-1)
            panel.violin(..., col = "transparent",
                        varwidth =FALSE, box.ratio = box.ratio)
            panel.bwplot(..., fill = NULL, box.ratio = .1)})

##### Retardo de los pedidos en horas en los distintos procesos #####
dotplot( PROCESO_MAQUINAS ~Retardo.horas , data = Datos, xlab="Retardos de los pedidos en horas",
        ylab= "Procesos",main = "Retardo de los pedidos en horas en los distintos procesos")
#### El mismo más detallado ####
dotplot(PROCESO_MAQUINAS~Retardo.horas, data=Datos,
        main="Retardo de los pedidos en horas en los distintos procesos",
        xlab="Retardos en horas", ylab="Grupos de procesos",
        panel = function(..., box.ratio) {
            panel.grid(h=0,v=-1)
            panel.violin(..., col = "transparent",
                        varwidth =FALSE, box.ratio = box.ratio)
            panel.bwplot(..., fill = NULL, box.ratio = .1)})

##### Retardos hora en las máquinas dependiendo del numero de procesos y los colores#####
Datos <- within(data = Datos,
{MaqFabr <- factor(MaqFabr, levels = c("1", "2", "3", "4", "5", "6", "7", "8", "9", "10", "11"))})

barchart(Retardo.horas ~ PROCESO_MAQUINAS | MaqFabr, data = Datos,
        groups = NUM_COLORES,layout = c(1,11), stack = F,
        main= "Retardos hora en las máquinas dependiendo del numero de procesos y los colores",
        auto.key = list(space = "right",title="Número de tintas",cex=0.6),ylim=c(0,1000),
        ylab = "Retardos en horas", xlab="Procesos")

#####Retardos en horas en las máquinas dependiendo de los procesos
dotplot(PROCESO_MAQUINAS ~ Retardo.horas | MaqFabr, data = Datos,
        main= "Retardos en horas en las máquinas dependiendo de los procesos",xlab="Retardos en horas",
        ylab="Procesos")

```

```
##### Pedidos por tipo de papel y máquina #####
table(Datos$PAPEL1, Datos$MaqFabr)
count4 <- table(Datos$PAPEL1, Datos$MaqFabr)
names.argPaM=c("BB12", "BB17", "BI12", "BI17", "BI20",
               "E118", "E218", "KB14", "KL12 ", "KL17", "KL22 ", "SK14", "TL14", "TL17", "WE19")
barplot(count4,col = rainbow(15),
        main = "Pedidos por tipo papel y máquina",
        font.main = 4, legend = rownames(Datos$PAPEL1),
        legend.text =names.argPaM,xlab="Distintas máquinas",ylab= "Pedidos",
        font.sub = 3, beside=F,args.legend = list(cex=0.6,title="Tipo de papel"))

#####
xyplot( PAPEL1 ~MaqFabr , data = Datos, xlab="Máquinas", ylab= "Tipo de papel",
       main = "Pedidos tipo de papel y máquina", xscales="same")

#####Pedidos por tipo papel y procesos #####
table(Datos$PAPEL1, Datos$PROCESO_MAQUINAS)
count5 <- table(Datos$PAPEL1, Datos$PROCESO_MAQUINAS)
names.argPaM=c("BB12", "BB17", "BI12", "BI17", "BI20",
               "E118", "E218", "KB14", "KL12 ", "KL17", "KL22 ", "SK14", "TL14", "TL17", "WE19")
barplot(count5,col = rainbow(15),
        main = "Pedidos por tipo papel y procesos",
        font.main = 4, legend = list(rownames(Datos$PAPEL1),cex= 0,2),
        xlab="Distintos procesos",ylab= "Pedidos",legend.text =names.argPaM,
        font.sub = 3, beside=F, args.legend = list(cex=0.6,title="Tipo de papel"))

#####
xyplot( PAPEL1 ~PROCESO_MAQUINAS , data = Datos, xlab="Procesos", ylab= "Tipo de papel",
       main = "Pedidos tipo de papel y procesos")

##### Puntos de pegado #####
#####Puntos de pegado en máquinas
xyplot( PUNTOS_PEGADO ~MaqFabr , data = Datos, xlab="Máquinas", ylab= "Puntos de pegado",
       main = "Puntos de pegado en máquinas")
#####Puntos de pegado en procesos
xyplot( PUNTOS_PEGADO ~PROCESO_MAQUINAS , data = Datos, xlab="Procesos", ylab= "Puntos de pegado",
       main = "Puntos de pegado en procesos")

#####
```

4.3 Anexo 3. Análisis de los datos.

```
require(gdata)
Datos<-read.xls ("DatosTFG.xlsx")
install.packages("lubridate")
library(lubridate)

### Nos centramos en estudiar los retardos de los pedidos
#####
Datos$Retardo <-interval (Datos$FecPlanif , Datos$FecFabr)
Datos$Retardo <- as.duration(Datos$Retardo)
Datos$Retardo.horas <- Datos$Retardo/3600
Datos$Retardo.horas <- round(Datos$Retardo.horas, 2)
Datos$Retardo.horas <- as.duration(Datos$Retardo.horas)
sum(Datos$Retardo.horas)
mean(Datos$Retardo.horas) # Retardo medio por pedido en horas 61.04433
sd(Datos$Retardo.horas) # 98.90931

#####
summary(Datos) # Medidas estadísticas de todas las variables
summary(Datos$Retardo.horas) # Medidas estadísticas los pedidos con
#retardos expresados en horas

## Pedidos con retardo menor que la media
Poco.retardo <- subset(Datos, subset=Retardo.horas <
                      mean(Datos$Retardo.horas))

## Pedidos con retardo mayor de 24 horas
any(Datos$Retardo.horas>24)
sum(Datos$Retardo.horas>24) #1138

##### Representación gráfica de los retardos en horas ###
hist(Datos$Retardo.horas, freq=F, xlim=c(-300,400),
     main= "Retardo en los pedidos expresados en horas", xlab="Horas")
# Vemos como se comportan los retardos comparándolo con la curva teórica de la normal.
curve(dnorm(x,61.04433,98.90931),add=TRUE)

## Genero 2000 valores aleatorios que se ajusten a una Normal
# con media y desviación típica de la variable Retardo.horas de los datos originales
set.seed(987)
Pedidos.retardo <- rnorm(2000, mean = 61.04433, sd = 98.90931)
hist(Pedidos.retardo, freq=F ,main= "Retardo en los pedidos simulados expresados en horas",
     xlab="Horas de retardo")
curve(dnorm(x,61.04433,98.90931),add=TRUE) #curva teórica

mean(Pedidos.retardo) #60.90953
sd(Pedidos.retardo) #99.04895
```

```

##### Calculo el número de pedidos con retardo y la proporción, de los datos originales
length(Datos$Retardo.horas [Datos$Retardo > 0])
length(Datos$Retardo.horas [Datos$Retardo > 0]) / length(Datos$Retardo.horas)
##### Calculo el número de pedidos con retardo y la proporción, de los datos generados
length(Pedidos.retardo [Pedidos.retardo > 0])
length(Pedidos.retardo [Pedidos.retardo > 0]) / length(Pedidos.retardo)
mean(Pedidos.retardo) # Media de pedidos con retardo en los datos generados
# [1] 60.90953
mean(Datos$Retardo.horas) # Media de pedidos con retardo en los datos originales
# [1] 61.04433
## Vemos como la media de los datos generados es menor que la de los datos originales

#####

##### Creamos una tabla donde los pedidos están ordenados por máquinas
Datos.Maquinas <- Datos[order(Datos$MaqFabr),]
#### Solo selecciono las columnas que me interesan
Datos.Maquinas <- subset(Datos.Maquinas, select = c(pe_pedido, MaqFabr, NUM_COLORES, pc_master,
          TTiradaPlanif, TTiradaFabr, TPreparacionPlanif, TPreparacionFabr,
          TTotalPlanif, TTotalFabr))

#### Creo un vector con los totales de pedidos en cada máquina
totales.maq = c(1:11)
for (m in 1:11){
  totales.maq[m] <- sum(Datos.Maquinas$MaqFabr == m)}
##### Lo transformo en totales de pedidos acumulados por máquina
for (m in 2:11){
  totales.maq[m] <- totales.maq[m -1] + totales.maq[m]}
totales.maq

#### Genero la columna Fin.previsto y le inserto los valores correspondientes ###
Datos.Maquinas$Fin.previsto <- Datos.Maquinas$TTotalPlanif
## Para la máquina 1
for (j in 2:totales.maq[1]){
  Datos.Maquinas$Fin.previsto[j] <- Datos.Maquinas$Fin.previsto[j- 1] +
  Datos.Maquinas$TTotalPlanif[j]}

## Para las demas máquinas
for (m in 2:11){
  for (j in (totales.maq[m-1] +2) :totales.maq[m]){
    Datos.Maquinas$Fin.previsto[j] <- Datos.Maquinas$Fin.previsto[j- 1] +
    Datos.Maquinas$TTotalPlanif[j]}
}

```

```

#### Genero la columna Fin.real.sin.huecos y le inserto los valores correspondientes ###
Datos.Maquinas$Fin.real.sin.huecos <- Datos.Maquinas$TTotalFabr
## Para la máquina 1
for (j in 2:totales.maq[1]){
  Datos.Maquinas$Fin.real.sin.huecos[j] <- Datos.Maquinas$Fin.real.sin.huecos[j- 1] +
  Datos.Maquinas$TTotalFabr[j]}

## Para las demas máquinas
for (m in 2:11){
  for (j in (totales.maq[m-1] +2) :totales.maq[m]){
    Datos.Maquinas$Fin.real.sin.huecos[j] <- Datos.Maquinas$Fin.real.sin.huecos[j- 1] +
    Datos.Maquinas$TTotalFabr[j]}}

#### Genero la columna retardos en máquinas #####
Datos.Maquinas$Retardos.en.máquinas <- Datos.Maquinas$Fin.real.sin.huecos-
  Datos.Maquinas$Fin.previsto

##### Media de retrasos calculados para las distintas máquinas ####
#### Media de retrasos maquina 1 ####
for (j in 1:totales.maq[1]){
  mean.1 <- mean(Datos.Maquinas$Retardos.en.máquinas)}
mean.1

### Para el resto de máquinas #
sum <- rep(0,11)
media <- rep(0,11)

for (m in 2:11){
  for (j in (totales.maq[m -1] +1 ) :totales.maq[m]){
    sum[m] <- sum[m] + Datos.Maquinas$Retardos.en.máquinas[j]}}

for (m in 2:11){
  media[m] <- sum[m] / (totales.maq[m] - totales.maq[m -1])}

media[1] <- mean.1
media
## Resumen
Resumen.medias<-matrix(media,nrow=11)
colnames(Resumen.medias)<-c("Retrasos medios por máquina")
rownames(Resumen.medias)<-c("M1", "M2", "M3", "M4", "M5", "M6", "M7", "M8", "M9", "M10", "M11")
Resumen.medias

```

```

##### SELECCIONAMOS POR EJEMPLO LA MÁQUINA 8 #####
#Datos de la máquina 8
Datos.Maquina8<-Datos.Maquinas[Datos.Maquinas$MaqFabr=="8",]

##### Seleccionamos una muestra de datos dentro de esta máquina por ejemplo los 10 primeros

##### Realizaré 5 ordenaciones de esa muestra
## La primera,la dejo como está así que no tengo que recalculr los retardos ya los tengo.
Muestra.M8.1 <- Datos.Maquina8 [1:10,]
mean(Muestra.M8.1$Retardos.en.máquinas)
#[1] 12092.8 Media de retardo en la maquina 8 seleccionando los 10 primeros pedidos
Muestra.M8.1$Retardos.en.máquinas
#[1] -328 -885 -534 5222 6484 10328 24513 25115 25373 25640
sum(Muestra.M8.1$Retardos.en.máquinas>0)
# [1] 7, Vemos que hay 7 trabajos tardíos en esa muestra

### Cambios de color en la muestra
Cambio.de.color.1 <- 0
for(c in 2:10){
  if (Muestra.M8.1$NUM_COLORES[c] == Muestra.M8.1$NUM_COLORES[c - 1])
    {Cambio.de.color.1 <- Cambio.de.color.1 + 0}
  else {Cambio.de.color.1 <- Cambio.de.color.1 + 1}}
Cambio.de.color.1
#####

##### Genero otra ordenación considerando el orden inverso de los trabajos
Muestra.M8.2 <- Muestra.M8.1[10:1, ]

## Recalculo los retardos de esta secuencia
## Recalculo Fin.previsto
Muestra.M8.2$Fin.previsto <- Muestra.M8.2$TTotalPlanif
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.2$Fin.previsto[i] <- Muestra.M8.2$Fin.previsto[i- 1] +
  Muestra.M8.2$TTotalPlanif[i]}

## Recalculo Fin.real.sin.huecos
Muestra.M8.2$Fin.real.sin.huecos <- Muestra.M8.2$TTotalFabr
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.2$Fin.real.sin.huecos[i] <- Muestra.M8.2$Fin.real.sin.huecos[i- 1] +
  Muestra.M8.2$TTotalFabr[i]}

## Recalculo la columna retardos en máquinas
Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas <- Muestra.M8.2$Fin.real.sin.huecos-
  Muestra.M8.2$Fin.previsto

```

```

mean(Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas)
# [1] 16111.2 media de retardos en esta muestra
Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas
# [1] 267 525 1127 15312 19156 20418 26174 26525 25968 25640
sum(Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas>0)
# [1] 10, vemos que todos los trabajos son tardíos.
## Cambios de color en la muestra
Cambio.de.color.2 <- 0
for(c in 2:10){
  if (Muestra.M8.2$NUM_COLORES[c] == Muestra.M8.2$NUM_COLORES[c - 1])
    {Cambio.de.color.2 <- Cambio.de.color.2 + 0}
  else {Cambio.de.color.2 <- Cambio.de.color.2 + 1}}
Cambio.de.color.2

#####
# Permuta el trabajo 1 y 2 de la muestra inicial
Muestra.M8.3 <- Muestra.M8.1[c(2,1,3,4,5,6,7,8,9,10), ]
## Recalculo los retardos de esta secuencia
## Recalculo Fin.previsto
Muestra.M8.3$Fin.previsto <- Muestra.M8.3$TotalPlanif
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.3$Fin.previsto[i] <- Muestra.M8.3$Fin.previsto[i- 1] +
  Muestra.M8.3$TotalPlanif[i]}

## Recalculo Fin.real.sin.huecos
Muestra.M8.3$Fin.real.sin.huecos <- Muestra.M8.3$TotalFabr
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.3$Fin.real.sin.huecos[i] <- Muestra.M8.3$Fin.real.sin.huecos[i- 1] +
  Muestra.M8.3$TotalFabr[i]}

## Recalculo la columna retardos en máquinas
Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas <- Muestra.M8.3$Fin.real.sin.huecos-
  Muestra.M8.3$Fin.previsto

mean(Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas)
# [1] 12069.9 media de retardos en esta muestra
Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas
# -557 -885 -534 5222 6484 10328 24513 25115 25373 25640
sum(Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas>0)
# [1] 7, Vemos que hay 7 trabajos tardíos en esa muestra
## Cambios de color en la muestra
Cambio.de.color.3 <- 0
for(c in 2:10){
  if (Muestra.M8.3$NUM_COLORES[c] == Muestra.M8.3$NUM_COLORES[c - 1])
    {Cambio.de.color.3 <- Cambio.de.color.3 + 0}
  else {Cambio.de.color.3 <- Cambio.de.color.3 + 1}}
Cambio.de.color.3

```

```

#####
# Ponemos el trabajo 5 y 6 los primeros
Muestra.M8.4 <- Muestra.M8.1[c(5,6,1,2,3,4,7,8,9,10), ]
## Recalculo los retardos de esta secuencia
## Recalculo Fin.previsto
Muestra.M8.4$Fin.previsto <- Muestra.M8.4$TotalPlanif
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.4$Fin.previsto[i] <- Muestra.M8.4$Fin.previsto[i- 1] +
  Muestra.M8.4$TotalPlanif[i]}

## Recalculo Fin.real.sin.huecos
Muestra.M8.4$Fin.real.sin.huecos <- Muestra.M8.4$TotalFabr
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.4$Fin.real.sin.huecos[i] <- Muestra.M8.4$Fin.real.sin.huecos[i- 1] +
  Muestra.M8.4$TotalFabr[i]}

## Recalculo la columna retardos en máquinas
Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas <- Muestra.M8.4$Fin.real.sin.huecos-
  Muestra.M8.4$Fin.previsto

mean(Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas)
# [1] 13090.8 media de retardos en esta muestra
Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas
# 1262 5106 4778 4221 4572 10328 24513 25115 25373 25640
sum(Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas>0)
# [1] 10,vemos que todos los trabajos son tardíos.

## Cambios de color en la muestra
Cambio.de.color.4 <- 0
for(c in 2:10){
  if (Muestra.M8.4$NUM_COLORES[c] == Muestra.M8.4$NUM_COLORES[c - 1])
  {Cambio.de.color.4 <- Cambio.de.color.4 + 0}
  else {Cambio.de.color.4 <- Cambio.de.color.4 + 1}}
Cambio.de.color.4

#####
# Permutamos el trabajo 2 y 3
Muestra.M8.5 <- Muestra.M8.1[c(1,3,2,4,5,6,7,8,9,10), ]
## Recalculo los retardos de esta secuencia
## Recalculo Fin.previsto
Muestra.M8.5$Fin.previsto <- Muestra.M8.5$TotalPlanif
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.5$Fin.previsto[i] <- Muestra.M8.5$Fin.previsto[i- 1] +
  Muestra.M8.5$TotalPlanif[i]}

```

```

## Recalculo Fin.real.sin.huecos
Muestra.M8.5$Fin.real.sin.huecos <- Muestra.M8.5$TTotalFabr
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.5$Fin.real.sin.huecos[i] <- Muestra.M8.5$Fin.real.sin.huecos[i- 1] +
  Muestra.M8.5$TTotalFabr[i]}

## Recalculo la columna retardos en máquinas
Muestra.M8.5$Retardos.en.máquinas <- Muestra.M8.5$Fin.real.sin.huecos-
  Muestra.M8.5$Fin.previsto

mean(Muestra.M8.5$Retardos.en.máquinas)
# [1] 12183.6 media de retardos en esta muestra
Muestra.M8.5$Retardos.en.máquinas
# [1] -328 23 -534 5222 6484 10328 24513 25115 25373 25640
sum(Muestra.M8.5$Retardos.en.máquinas>0)
# [1] 8 Vemos que hay 8 trabajos tardíos en esa muestra
## Cambios de color en la muestra
Cambio.de.color.5 <- 0
for(c in 2:10){
  if (Muestra.M8.5$NUM_COLORES[c] == Muestra.M8.5$NUM_COLORES[c - 1])
  {Cambio.de.color.5 <- Cambio.de.color.5 + 0}
  else {Cambio.de.color.5 <- Cambio.de.color.5 + 1}}
Cambio.de.color.5

##### Resumen #####
Media.de.los.retardos <-c(mean(Muestra.M8.1$Retardos.en.máquinas),
  mean(Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas),
  mean(Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas),
  mean(Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas),
  mean(Muestra.M8.5$Retardos.en.máquinas))

Media.de.los.retardos

Trabajos.tardios <- c(sum(Muestra.M8.1$Retardos.en.máquinas>0),
  sum(Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas>0),
  sum(Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas>0),
  sum(Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas>0),
  sum(Muestra.M8.5$Retardos.en.máquinas>0))

Trabajos.tardios

Cambio.de.color <- c(Cambio.de.color.1,Cambio.de.color.2,Cambio.de.color.3,
  Cambio.de.color.4,Cambio.de.color.5)

Cambio.de.color

Resumen.medidas <- c(Media.de.los.retardos, Trabajos.tardios, Cambio.de.color)
Resumen<-matrix(Resumen.medidas,nrow=5)
colnames(Resumen)<-c("Promedio de retrasos","Trabajos retrasados", "Cambios.de.color")
rownames(Resumen)<-c("Ordenación 1","Ordenación 2","Ordenación 3","Ordenación 4","Ordenación 5")
Resumen

```

```
##### SIMULACIÓN
# Teniendo en cuenta el resumen, vemos que pasaría si en las ordenaciones anteriores, generamos
# aleatoriamente tiempos de totales planificados de los pedidos a los que llamaremos
# Tiempos.generados.planificados y tambien generaremos tiempos de totales de fabricación a los que
# llamaremos Tiempos.generados.reales, con ellos calcularé los retrasos, promedios de retrasos y
# trabajos retrasados en cada una de las ordenaciones anteriores.

# Generaré esos valores mediante una normal con media y varianza.. para
# Tiempos.generados.planificados usaremos los valores de TTotalPlanif y para Tiempos.generados.reales
# usaremos los valores de TTotalFabr de la muestra.

# Tiempos.generados.planificados:
mean(Muestra.M8.1$TTotalPlanif) # 1886.5
sd(Muestra.M8.1$TTotalPlanif) # 477.9194
set.seed(987)
Muestra.M8.1$Tiempos.generados.planificados <- rnorm(10, mean = 1886.5, sd = 477.9194)
# Tiempos.generados.reales:
mean(Muestra.M8.1$TTotalFabr) # 4450.5
sd(Muestra.M8.1$TTotalFabr) # 4400.303
set.seed(987)
Muestra.M8.1$Tiempos.generados.reales <- rnorm(10, mean = 4450.5, sd = 4400.303)

# Ahora vuelvo a hacer todos los pasos anteriores en cada ordenación, para calcular
# los retardos generados, su media y trabajos tardíos.(los cambios de color serán los mismos).

#### Ordenacion 1:
## Recalculo los retardos de esta secuencia.generado
## Recalculo Fin.previsto.generado
Muestra.M8.1$Fin.previsto.generado <- Muestra.M8.1$Tiempos.generados.planificados
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.1$Fin.previsto.generado[i] <- Muestra.M8.1$Fin.previsto.generado[i- 1] +
  Muestra.M8.1$Tiempos.generados.planificados[i]}

## Recalculo Fin.real.sin.huecos.generado
Muestra.M8.1$Fin.real.sin.huecos.generado <- Muestra.M8.1$Tiempos.generados.reales
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.1$Fin.real.sin.huecos.generado[i] <- Muestra.M8.1$Fin.real.sin.huecos.generado[i- 1] +
  Muestra.M8.1$Tiempos.generados.reales[i]}

## Recalculo la columna retardos en máquinas
Muestra.M8.1$Retardos.en.máquinas.generado <- Muestra.M8.1$Fin.real.sin.huecos.generado-
  Muestra.M8.1$Fin.previsto.generado
mean(Muestra.M8.1$Retardos.en.máquinas.generado)
#[1] 14006.43 Media de retardo generado en la maquina 8 seleccionando los 10 primeros pedidos
Muestra.M8.1$Retardos.en.máquinas.generado
sum(Muestra.M8.1$Retardos.en.máquinas.generado>0)
# [1] 10. Vemos que todos los trabajos son tardíos en esa muestra
```

```

#### Ordenacion 2
## Recalculo los retardos de esta secuencia.generado
## Recalculo Fin.previsto.generado
Muestra.M8.2 <- Muestra.M8.1[10:1, ]

Muestra.M8.2$Fin.previsto.generado <- Muestra.M8.2$Tiempos.generados.planificados
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.2$Fin.previsto.generado[i] <- Muestra.M8.2$Fin.previsto.generado[i- 1] +
  Muestra.M8.2$Tiempos.generados.planificados[i]}

## Recalculo Fin.real.sin.huecos.generados
Muestra.M8.2$Fin.real.sin.huecos.generado <- Muestra.M8.2$Tiempos.generados.reales
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.2$Fin.real.sin.huecos.generado[i] <- Muestra.M8.2$Fin.real.sin.huecos.generado[i- 1] +
  Muestra.M8.2$Tiempos.generados.reales[i]}

## Recalculo la columna retardos en máquinas
Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas.generado <- Muestra.M8.2$Fin.real.sin.huecos.generado -
  Muestra.M8.2$Fin.previsto.generado

mean(Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas.generado)
# [1] 785.4518 media de retardos en esta muestra
Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas.generado
sum(Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas.generado>0)
# [1] 4,vemos que 4 trabajos son tardíos.

#### Ordenación 3
Muestra.M8.3 <- Muestra.M8.1[c(2,1,3,4,5,6,7,8,9,10), ]
## Recalculo los retardos de esta secuencia.generado
## Recalculo Fin.previsto.generado
Muestra.M8.3$Fin.previsto.generado <- Muestra.M8.3$Tiempos.generados.planificados
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.3$Fin.previsto.generado[i] <- Muestra.M8.3$Fin.previsto.generado[i- 1] +
  Muestra.M8.3$Tiempos.generados.planificados[i]}

## Recalculo Fin.real.sin.huecos.generado
Muestra.M8.3$Fin.real.sin.huecos.generado <- Muestra.M8.3$Tiempos.generados.reales
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.3$Fin.real.sin.huecos.generado[i] <- Muestra.M8.3$Fin.real.sin.huecos.generado[i- 1] +
  Muestra.M8.3$Tiempos.generados.reales[i]}

## Recalculo la columna retardos en máquinas
Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas.generado <- Muestra.M8.3$Fin.real.sin.huecos.generado-
  Muestra.M8.3$Fin.previsto.generado

```

```

mean(Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas.generado)
# [1] 14134.69 media de retardos en esta muestra
Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas.generado
sum(Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas.generado>0)
# [1] 10 ,vemos que todos los trabajos son tardíos.

### Ordenación 4
Muestra.M8.4 <- Muestra.M8.1[c(5,6,1,2,3,4,7,8,9,10), ]
## Recalculo los retardos de esta secuencia.generado
## Recalculo Fin.previsto.generado
Muestra.M8.4$Fin.previsto.generado <- Muestra.M8.4$Tiempos.generados.planificados
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.4$Fin.previsto.generado[i] <- Muestra.M8.4$Fin.previsto.generado[i- 1] +
  Muestra.M8.4$Tiempos.generados.planificados[i]}

## Recalculo Fin.real.sin.huecos.generado
Muestra.M8.4$Fin.real.sin.huecos.generado <- Muestra.M8.4$Tiempos.generados.reales
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.4$Fin.real.sin.huecos.generado[i] <- Muestra.M8.4$Fin.real.sin.huecos.generado[i- 1] +
  Muestra.M8.4$Tiempos.generados.reales[i]}

## Recalculo la columna retardos en máquinas
Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas.generado <- Muestra.M8.4$Fin.real.sin.huecos.generado-
Muestra.M8.4$Fin.previsto.generado

mean(Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas.generado)
# [1] 13627.35 media de retardos en esta muestra
Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas.generado
sum(Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas.generado>0)
# [1] 10,vemos que todos los trabajos son tardíos.

### Ordenación 5
Muestra.M8.5 <- Muestra.M8.1[c(1,3,2,4,5,6,7,8,9,10), ]
## Recalculo los retardos de esta secuencia.generado
## Recalculo Fin.previsto.generado
Muestra.M8.5$Fin.previsto.generado <- Muestra.M8.5$Tiempos.generados.planificados
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.5$Fin.previsto.generado[i] <- Muestra.M8.5$Fin.previsto.generado[i- 1] +
  Muestra.M8.5$Tiempos.generados.planificados[i]}

## Recalculo Fin.real.sin.huecos.generado
Muestra.M8.5$Fin.real.sin.huecos.generado <- Muestra.M8.5$Tiempos.generados.reales
for (i in 2:10){
  Muestra.M8.5$Fin.real.sin.huecos.generado[i] <- Muestra.M8.5$Fin.real.sin.huecos.generado[i- 1] +
  Muestra.M8.5$Tiempos.generados.reales[i]}

```

```

## Recalculo la columna retardos en máquinas
Muestra.M8.5$Retardos.en.máquinas.generado <- Muestra.M8.5$Fin.real.sin.huecos.generado-
  Muestra.M8.5$Fin.previsto.generado

mean(Muestra.M8.5$Retardos.en.máquinas.generado)
# [1] 14243.53 media de retardos en esta muestra
Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas.generado
sum(Muestra.M8.5$Retardos.en.máquinas.generado>0)
# [1] 10 ,vemos que todos los trabajos son tardíos.

##### Resumen #####
Media.de.los.retardos.generado <-c(mean(Muestra.M8.1$Retardos.en.máquinas.generado),
  mean(Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas.generado),
  mean(Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas.generado),
  mean(Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas.generado),
  mean(Muestra.M8.5$Retardos.en.máquinas.generado))
Media.de.los.retardos.generado

Trabajos.tardios.generado <- c(sum(Muestra.M8.1$Retardos.en.máquinas.generado>0),
  sum(Muestra.M8.2$Retardos.en.máquinas.generado>0),
  sum(Muestra.M8.3$Retardos.en.máquinas.generado>0),
  sum(Muestra.M8.4$Retardos.en.máquinas.generado>0),
  sum(Muestra.M8.5$Retardos.en.máquinas.generado>0))
Trabajos.tardios.generado

Resumen.medidas.generado <- c(Media.de.los.retardos.generado, Trabajos.tardios.generado)
Resumen.generado<-matrix(Resumen.medidas.generado,nrow=5)
colnames(Resumen.generado)<-c("Promedio de retrasos generados","Trabajos retrasados generados")
rownames(Resumen.generado)<-c("Ordenación 1","Ordenación 2","Ordenación 3","Ordenación 4","Ordenación 5")
Resumen.generado
#
# Ordenación 1          Promedio de retrasos generados Trabajos retrasados generados
# Ordenación 2          785.4518 4
# Ordenación 3          14134.6941 10
# Ordenación 4          13627.3473 10
# Ordenación 5          14243.5279 10

Resumen.total <- c(Media.de.los.retardos, Trabajos.tardios,
  Media.de.los.retardos.generado, Trabajos.tardios.generado, Cambio.de.color)
Resumen.Total <-matrix(Resumen.total,nrow=5)
colnames(Resumen.Total)<-c("Media retrasos","Trabajos tardíos",
  "Media retrasos.g","Trabajos tardíos.g","Cambios de color")
rownames(Resumen.Total)<-c("Ordenación 1","Ordenación 2","Ordenación 3","Ordenación 4","Ordenación 5")
Resumen.Total

```

```

### REPETIMOS EL PROCESO DE SIMULACIÓN 15 VECES por ejemplo, para la muestra de 10 observaciones
# que tenemos anteriormente, al seleccionar los 10 primeros pedidos de la máquina 8.
# TGP son los tiempos generados planificados
# TGR son los tiempos generados reales

n <- 15
TGP <- matrix(0,ncol=n, nrow=10)
set.seed(987)
for (j in 1:n) {
  TGP[,j]<- rnorm(10, mean = 1886.5, sd = 477.9194)}
colnames(TGP) <- c("TGP1", "TGP2", "TGP3", "TGP4", "TGP5", "TGP6", "TGP7", "TGP8", "TGP9", "TGP10",
                  "TGP11", "TGP12", "TGP13", "TGP14", "TGP15")

TGR <- matrix(0,ncol=n, nrow=10)
set.seed(987)
for (j in 1:n) {
  TGR[,j]<- rnorm(10, mean = 4450.5, sd = 4400.303)}
colnames(TGR) <- c("TGR1", "TGR2", "TGR3", "TGR4", "TGR5", "TGR6", "TGR7", "TGR8", "TGR9", "TGR10",
                  "TGR11", "TGR12", "TGR13", "TGR14", "TGR15")

SIMULADOS <- matrix(0,ncol=45, nrow=10)
TOTALES <- cbind(TGP,TGR,SIMULADOS)

### Para la primera observación:
for(j in 1:n){
  TOTALES[1,j + 30] <-TOTALES[1,j]}

for(j in 1:n){
  TOTALES[1,j + 45] <- TOTALES[1,j + 15]}

## Para las demas observaciones:
for(j in 1:n){
  for(i in 2:10){
    TOTALES[i,j + 30] <- TOTALES[i- 1,j + 30] + TOTALES[i,j]}}

for(j in 1:n){
  for(i in 2:10){
    TOTALES[i,j + 45] <- TOTALES[i- 1,j + 45 ] + TOTALES[i,j + 15]}}

for(j in 1:n){
  for(i in 1:10){
    TOTALES[i,j + 60] <- TOTALES[i,j + 45] - TOTALES[i,j + 30]}}

```

```

# La matriz TOTALES tiene 10 observaciones y 75 variables.
# tenemos 15 simulaciones de cada una de las siguientes variables:
# de tiempos generados planificados (15 col) y tiempos generados reales (15 col),
# con ellas he calculado: fin previsto generado(15 col), fin real sin huecos generado(15 col)
# y retardos en máquinas generados (15 col).
TOTALES <- data.frame(TOTALES)
## Incluyo ese data frame en la Muestra.M8.1
Muestra.M8.1 <- cbind(Muestra.M8.1,TOTALES)

##### Ordenacion 1:
# Tras incluir TOTALES en la Muestra.M8.1 (con 93 variables) vemos que los retardos medios
# de las 15 simulaciones están entre las columnas 79 - 93 (son las últimas 15 columnas)
# calculamos las medias:
Medias.ordenacion.1 <- rep(0,15)
for (i in 1:n){
  Medias.ordenacion.1[i] <- mean(Muestra.M8.1[,i + 78])}
Trabajos.tradíos.1 <- rep(0,15)
for (i in 1:n){
  Trabajos.tradíos.1[i] <-sum(Muestra.M8.1[,i + 78]>0)}
Trabajos.tradíos.1

##### Ordenacion 2:
TOTALES.2 <- cbind(TGP,TGR,SIMULADOS)
TOTALES.2 <- TOTALES.2[nrow(TOTALES.2):1, ]
### Para la primera observación:
for(j in 1:n){
  TOTALES.2[1,j + 30] <-TOTALES.2[1,j]}

for(j in 1:n){
  TOTALES.2[1,j + 45] <- TOTALES.2[1,j + 15]}

## Para las demas observaciones:
for(j in 1:n){
  for(i in 2:10){
    TOTALES.2[i,j + 30] <- TOTALES.2[i- 1,j + 30] + TOTALES.2[i,j]}

for(j in 1:n){
  for(i in 2:10){
    TOTALES.2[i,j + 45] <- TOTALES.2[i- 1,j + 45 ] + TOTALES.2[i,j + 15]}

for(j in 1:n){
  for(i in 1:10){
    TOTALES.2[i,j + 60] <- TOTALES.2[i,j + 45] - TOTALES.2[i,j + 30]}

```

```

TOTALES.2 <- data.frame(TOTALES.2)
## Incluyo ese data frame en la Muestra.M8.2
Muestra.M8.2 <- cbind(Muestra.M8.2,TOTALES.2)

Medias.ordenacion.2 <- rep(0,15)
for (i in 1:n){
  Medias.ordenacion.2[i] <- mean(Muestra.M8.2[,i + 78])}
Trabajos.tradios.2 <- rep(0,15)
for (i in 1:n){
  Trabajos.tradios.2[i] <-sum(Muestra.M8.2[,i + 78]>0)}
Trabajos.tradios.2

#### Ordenacion 3:
TOTALES.3 <- cbind(TGP,TGR,SIMULADOS)
TOTALES.3 <- TOTALES.3[c(2,1,3,4,5,6,7,8,9,10), ]
## Para la primera observación:
for(j in 1:n){
  TOTALES.3[1,j + 30] <-TOTALES.3[1,j]}

for(j in 1:n){
  TOTALES.3[1,j + 45] <- TOTALES.3[1,j + 15]}

## Para las demas observaciones:
for(j in 1:n){
  for(i in 2:10){
    TOTALES.3[i,j + 30] <- TOTALES.3[i- 1,j + 30] + TOTALES.3[i,j]}

for(j in 1:n){
  for(i in 2:10){
    TOTALES.3[i,j + 45] <- TOTALES.3[i- 1,j + 45 ] + TOTALES.3[i,j + 15]}

for(j in 1:n){
  for(i in 1:10){
    TOTALES.3[i,j + 60] <- TOTALES.3[i,j + 45] - TOTALES.3[i,j + 30]}

TOTALES.3 <- data.frame(TOTALES.3)
## Incluyo ese data frame en la Muestra.M8.3
Muestra.M8.3 <- cbind(Muestra.M8.3,TOTALES.3)

Medias.ordenacion.3 <- rep(0,15)
for (i in 1:n){
  Medias.ordenacion.3[i] <- mean(Muestra.M8.3[,i + 78])}
Trabajos.tradios.3 <- rep(0,15)
for (i in 1:n){
  Trabajos.tradios.3[i] <-sum(Muestra.M8.3[,i + 78]>0)}
Trabajos.tradios.3

```

```

#### Ordenacion 4:
TOTALES.4 <- cbind(TGP,TGR,SIMULADOS)
TOTALES.4 <- TOTALES.4[c(5,6,1,2,3,4,7,8,9,10), ]
### Para la primera observación:
for(j in 1:n){
  TOTALES.4[1,j + 30] <-TOTALES.4[1,j]}

for(j in 1:n){
  TOTALES.4[1,j + 45] <- TOTALES.4[1,j + 15]}

## Para las demas observaciones:
for(j in 1:n){
  for(i in 2:10){
    TOTALES.4[i,j + 30] <- TOTALES.4[i- 1,j + 30] + TOTALES.4[i,j]}

for(j in 1:n){
  for(i in 2:10){
    TOTALES.4[i,j + 45] <- TOTALES.4[i- 1,j + 45 ] + TOTALES.4[i,j + 15]}}

for(j in 1:n){
  for(i in 1:10){
    TOTALES.4[i,j + 60] <- TOTALES.4[i,j + 45] - TOTALES.4[i,j + 30]}}

TOTALES.4 <- data.frame(TOTALES.4)
## Incluyo ese data frame en la Muestra.M8.4
Muestra.M8.4 <- cbind(Muestra.M8.4,TOTALES.4)

Medias.ordenacion.4 <- rep(0,15)
for (i in 1:n){
  Medias.ordenacion.4[i] <- mean(Muestra.M8.4[,i + 78])}
Trabajos.tradíos.4 <- rep(0,15)
for (i in 1:n){
  Trabajos.tradíos.4[i] <-sum(Muestra.M8.4[,i + 78]>0)}
Trabajos.tradíos.4

#### Ordenacion 5:
TOTALES.5 <- cbind(TGP,TGR,SIMULADOS)
TOTALES.5 <- TOTALES.5[c(1,3,2,4,5,6,7,8,9,10), ]
### Para la primera observación:
for(j in 1:n){
  TOTALES.5[1,j + 30] <-TOTALES.5[1,j]}

for(j in 1:n){
  TOTALES.5[1,j + 45] <- TOTALES.5[1,j + 15]}

## Para las demas observaciones:
for(j in 1:n){
  for(i in 2:10){
    TOTALES.5[i,j + 30] <- TOTALES.5[i- 1,j + 30] + TOTALES.5[i,j]}

```

```

for(j in 1:n){
  for(i in 2:10){
    TOTALES.5[i,j + 45] <- TOTALES.5[i- 1,j + 45 ] + TOTALES.5[i,j + 15]}}

for(j in 1:n){
  for(i in 1:10){
    TOTALES.5[i,j + 60] <- TOTALES.5[i,j + 45] - TOTALES.5[i,j + 30]}}

TOTALES.5 <- data.frame(TOTALES.5)
## Incluyo ese data frame en la Muestra.M8.5
Muestra.M8.5 <- cbind(Muestra.M8.5,TOTALES.5)

Medias.ordenacion.5 <- rep(0,15)
for (i in 1:n){
  Medias.ordenacion.5[i] <- mean(Muestra.M8.5[,i + 78])}
Trabajos.tradíos.5 <- rep(0,15)
for (i in 1:n){
  Trabajos.tradíos.5[i] <-sum(Muestra.M8.5[,i + 78]>0)}
Trabajos.tradíos.5

##### Resumen
Resumen.ordenacion.1 <- c(Medias.ordenacion.1, Trabajos.tradíos.1)
Resumen.ordenacion.1<-matrix(Resumen.ordenacion.1,nrow=15)
colnames(Resumen.ordenacion.1)<-c("Promedio de retrasos","Trabajos retrasados")
rownames(Resumen.ordenacion.1)<-c("Simulación 1","Simulación 2","Simulación 3","Simulación 4",
                                "Simulación 5", "Simulación 6","Simulación 7","Simulación 8",
                                "Simulación 9", "Simulación 10","Simulación 11","Simulación 12",
                                "Simulación 13","Simulación 14","Simulación 15")

Resumen.ordenacion.1

```

```

Resumen.ordenacion.2 <- c(Medias.ordenacion.2, Trabajos.tradíos.2)
Resumen.ordenacion.2<-matrix(Resumen.ordenacion.2,nrow=15)
colnames(Resumen.ordenacion.2)<-c("Promedio de retrasos","Trabajos retrasados")
rownames(Resumen.ordenacion.2)<-c("Simulación 1","Simulación 2","Simulación 3","Simulación 4",
      "Simulación 5", "Simulación 6","Simulación 7","Simulación 8",
      "Simulación 9", "Simulación 10","Simulación 11","Simulación 12",
      "Simulación 13","Simulación 14","Simulación 15")

Resumen.ordenacion.2

Resumen.ordenacion.3 <- c(Medias.ordenacion.3, Trabajos.tradíos.3)
Resumen.ordenacion.3<-matrix(Resumen.ordenacion.3,nrow=15)
colnames(Resumen.ordenacion.3)<-c("Promedio de retrasos","Trabajos retrasados")
rownames(Resumen.ordenacion.3)<-c("Simulación 1","Simulación 2","Simulación 3","Simulación 4",
      "Simulación 5", "Simulación 6","Simulación 7","Simulación 8",
      "Simulación 9", "Simulación 10","Simulación 11","Simulación 12",
      "Simulación 13","Simulación 14","Simulación 15")

Resumen.ordenacion.3

Resumen.ordenacion.4 <- c(Medias.ordenacion.4, Trabajos.tradíos.4)
Resumen.ordenacion.4<-matrix(Resumen.ordenacion.4,nrow=15)
colnames(Resumen.ordenacion.4)<-c("Promedio de retrasos","Trabajos retrasados")
rownames(Resumen.ordenacion.4)<-c("Simulación 1","Simulación 2","Simulación 3","Simulación 4",
      "Simulación 5", "Simulación 6","Simulación 7","Simulación 8",
      "Simulación 9", "Simulación 10","Simulación 11","Simulación 12",
      "Simulación 13","Simulación 14","Simulación 15")

Resumen.ordenacion.4

Resumen.ordenacion.5 <- c(Medias.ordenacion.5, Trabajos.tradíos.5)
Resumen.ordenacion.5<-matrix(Resumen.ordenacion.5,nrow=15)
colnames(Resumen.ordenacion.5)<-c("Promedio de retrasos","Trabajos retrasados")
rownames(Resumen.ordenacion.5)<-c("Simulación 1","Simulación 2","Simulación 3","Simulación 4",
      "Simulación 5", "Simulación 6","Simulación 7","Simulación 8",
      "Simulación 9", "Simulación 10","Simulación 11","Simulación 12",
      "Simulación 13","Simulación 14","Simulación 15")

Resumen.ordenacion.5

Resumen.simulaciones <- c(Resumen.ordenacion.1,Resumen.ordenacion.2,Resumen.ordenacion.3,
      Resumen.ordenacion.4,Resumen.ordenacion.5)

Resumen.simulaciones <- matrix(Resumen.simulaciones,nrow=15)
colnames(Resumen.simulaciones)<-c("PR 0.1","TR 0.1",
      "PR 0.2","TR 0.2",
      "PR 0.3","TR 0.3",
      "PR 0.4","TR 0.4",
      "PR 0.5","TR 0.5")
rownames(Resumen.simulaciones)<-c("Simulación 1","Simulación 2","Simulación 3","Simulación 4",
      "Simulación 5", "Simulación 6","Simulación 7","Simulación 8",
      "Simulación 9", "Simulación 10","Simulación 11","Simulación 12",
      "Simulación 13","Simulación 14","Simulación 15")

```

```

# Para hacer una comparación de los resultados muestro los valores obtenidos en una tabla en la que
# para cada ordenación tras las 15 simulaciones,
# indico el promedio de retardo, media de trabajos retrasados, mejor y peor valor de retardos obtenido.

ORD.1 <- c(mean(Medias.ordenacion.1), mean(Trabajos.tradíos.1), min(Medias.ordenacion.1),
           max(Medias.ordenacion.1))
ORD.1 <-matrix(ORD.1,ncol=4)
ORD.1

ORD.2 <- c(mean(Medias.ordenacion.2), mean(Trabajos.tradíos.2), min(Medias.ordenacion.2),
           max(Medias.ordenacion.2))
ORD.2 <-matrix(ORD.2,ncol=4)
ORD.2

ORD.3 <- c(mean(Medias.ordenacion.3), mean(Trabajos.tradíos.3), min(Medias.ordenacion.3),
           max(Medias.ordenacion.3))
ORD.3 <-matrix(ORD.3,ncol=4)
ORD.3

ORD.4 <- c(mean(Medias.ordenacion.4), mean(Trabajos.tradíos.4), min(Medias.ordenacion.4),
           max(Medias.ordenacion.4))
ORD.4 <-matrix(ORD.4,ncol=4)
ORD.4

ORD.5 <- c(mean(Medias.ordenacion.5), mean(Trabajos.tradíos.5), min(Medias.ordenacion.5),
           max(Medias.ordenacion.5))
ORD.5 <-matrix(ORD.5,ncol=4)
ORD.5

Resumen.ORD <- rbind(ORD.1, ORD.2, ORD.3, ORD.4, ORD.5)
Resumen.ORD <- matrix(Resumen.ORD, ncol=4)
colnames(Resumen.ORD)<-c("Promedio R", "Promedio TR", "Mejor", "Peor")
rownames(Resumen.ORD)<-c("Ordenación 1","Ordenación 2","Ordenación 3","Ordenación 4","Ordenación 5")
Resumen.ORD

# Valores obtenidos de las 15 simulaciones en cada ordenación.
#
# Promedio R Promedio TR Mejor Peor
# Ordenación 1 17860.52 9.733333 5080.1606 32230.79
# Ordenación 2 15409.57 9.266667 785.4518 26488.80
# Ordenación 3 17607.52 9.533333 3960.3596 32596.09
# Ordenación 4 17167.14 9.600000 5392.8762 31905.30
# Ordenación 5 17844.83 9.866667 5638.1422 32623.27

# Se indica el promedio de retardo, media de trabajos retrasados,
# mejor y peor valor de retardos obtenido

```

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- V.Sels, M. G. (2011). A comparison of priority rules for the job shop scheduling problem under different flow time and tardiness-related objective functions. *International Journal of Production Research* .
- Unver, H. O. (2013). An ISA-95 based manufacturing intelligence system in support of lean initiatives. *The International Journal of Advance Manufacturing Technologies*.
- Anant Singh Jain, S. M. (1998). A State of the art review of Job Shop Scheduling Techniques. University of Dundee, Scotland. UK, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering.
- Asimag S.L. (2007). Manual de elaboración del cartón ondulado.
- C.Renzi, F. M. (Abril de 2014). A review on artificial intelligence applications to the optimal design of dedicated and reconfigurable manufacturing systems. *The international Journal of Advance Manufacturing Technologies*.
- Emilio L. Cano, J. M. (2012). *Six Sigma with R*. New York: Springer.
- Henao, L. F. (2009). Un modelo de control inteligente para sistemas de manufactura basado en los paradigmas Holónico y Multi-agente. Tesis de maestría en Ingeniería de sistemas, línea de investigación Inteligencia Artificial. Medellín, Colombia.
- J. Blazewicz, K. E. (1994). *Scheduling in Computer and Manufacturing System*. Springer.
- J.MacGregor Smith, B. T. (2013). *Handbook of Stochastic Models and Analysis of Manufacturing System Operations (Vol. 192)*. USA: Springer.
- Jay Heizer, B. R. (2009). *Principios de administración de operaciones*. México: Pearson Educación.
- Jaime A. Giraldo, C. A. (2013). Aprendiendo sobre secuenciación de trabajos en un Job Shop mediante el uso de simulación. *Formación Universitaria*. Universidad de Colombia.

- Jose Antonio Dominguez Machuca, S. G. (1995). Dirección de operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios. Madrid: McGraw-Hill.
- Lago Rodicio García. (2010). Herramientas tecnológicas para el desarrollo de procesos de fabricación.
- Lödding, H. (2013). Handbook of Manufacturing Control. (R. Rossi, Trad.) Hamburg, Germany: Springer.
- M. Garey, D. J. (1976). The complexity of Flowshop and Jobshop scheduling. New Jersey: Bell Laboratories.
- Omar Danilo Castrillón, E. L. (2011). Analysis of Job Shop problem through an expert system. 5th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. Cartagena.
- R. Pérez, S. J. (2015). Solución de un problema de secuenciamiento en configuración jobshop flexible utilizando un Algoritmo de Estimación de Distribuciones. ScienceDirect .
- R.Tavakkoli-Moghaddam, M.-M. (2005). A computer simulation model for job shop scheduling problems minimizing makespan. Computers & Industrial Engineering.
- Rafaela Alfalla Luque, M. R. (2008). Introducción a la dirección de operaciones táctico-operativa. Madrid: Delta publicaciones.