

**ASIGNACIÓN DE FECHAS DE ENTREGA FACTIBLES Y AJUSTADAS EN  
SISTEMAS JOB SHOP**

**MARCELA AGUIRRE PIZANO  
SARA LUCÍA ALZATE BELTRÁN**

**UNIVERSIDAD EAFIT  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN  
MEDELLÍN  
2011**

**ASIGNACIÓN DE FECHAS DE ENTREGA FACTIBLES Y AJUSTADAS EN  
SISTEMAS JOB SHOP**

**MARCELA AGUIRRE PIZANO**

**200510004012**

**2520791 / 3017969220**

**[maquirr2@eafit.edu.co](mailto:maquirr2@eafit.edu.co)**

**SARA LUCÍA ALZATE BELTRÁN**

**200627000012**

**3022817 / 3108920296**

**[salzate1@eafit.edu.co](mailto:salzate1@eafit.edu.co)**

**Proyecto de Grado para optar por el título de Ingeniería de producción**

**Asesor**

**JAIRO MAYA TORO**

**Ingeniero Mecánico**

**[jmaya@eafit.edu.co](mailto:jmaya@eafit.edu.co)**

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN**

**MEDELLÍN**

**2011**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Presidente del Jurado

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

Medellín, 14 de Octubre de 2011

## CONTENIDO

LISTA DE TABLAS .....	6
LISTA DE ECUACIONES.....	7
LISTA DE FIGURAS .....	8
GLOSARIO .....	10
INTRODUCCIÓN .....	1
1. OBJETIVOS.....	2
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	2
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
2. JUSTIFICACIÓN .....	3
3. ALCANCE .....	5
4. REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	7
5. MARCO TEÓRICO .....	17
5.2. MÉTODOS ESTÁTICOS.....	20
5.2.1. MÉTODO TWK.....	22
5.2.2. Método DELTA.....	23
5.3. PROGRAMACION FINITA .....	26
5.3.1. Estructura de la programación finita .....	28
6. METODOLOGÍA .....	31
6.1. SIMULACIÓN DEL JOB SHOP BASADO EN EVENTOS.....	31
6.1.1. Pseudocódigos .....	34
6.2. MÉTODOS ESTÁTICOS .....	37
6.3. PROGRAMACIÓN FINITA .....	38
6.3.1. Definiciones y símbolos .....	38
6.3.2. Datos de Entrada.....	39
6.4. TAMAÑO DE LA MUESTRA .....	44
6.4.1. Teorema central del límite .....	44
6.4.2. Algoritmo de funcionamiento .....	47
6.5. CÁLCULO FECHA DE ENTREGA .....	50

6.6. FUNCIONAMIENTO INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA DE LA PROGRAMACIÓN BASADA EN SIMULACIÓN .....	51
6.6.1. Pasos para ejecutar el programa.....	52
7. RESULTADOS.....	58
7.1. MÉTODOS ESTÁTICOS.....	58
7.1.1. Comportamiento métodos estáticos.....	58
7.1.2. Fechas de entrega para el método TWK .....	61
Fuente: elaboración propia .....	62
7.2. PROGRAMACIÓN FINITA .....	63
7.2.1. Calculo de percentiles .....	63
7.2.2. Fechas de entrega.....	67
7.2.3. Comparativo fechas de entrega .....	70
8. CONCLUSIONES .....	73
BIBLIOGRAFÍA .....	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Causas del conflicto entre producción y ventas.....	7
Tabla 2. Soluciones al conflicto entre producción y ventas .....	8
Tabla 3. Beneficios de la programación finita .....	27
Tabla 4. Modelo del Job shop .....	31
Tabla 5. Simbología .....	34
Tabla 6. Variables .....	35
Tabla 7. Registro de operaciones por máquina .....	41
Tabla 8. Factor de ajuste para la regla SPT .....	61
Tabla 9. Fechas de entrega con el método TWK .....	62
Tabla 10. Variación de las fechas de entrega de acuerdo al ajuste.....	68

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Common allowance (CON) .....	21
Ecuación 2. Number of operations in a job (NOPS) .....	21
Ecuación 3. Slack Time (SLK).....	21
Ecuación 4. Total work (TWK).....	22
Ecuación 5. Método Delta .....	24
Ecuación 6. Tiempo de flujo .....	25
Ecuación 7. Delta del tiempo de flujo .....	25
Ecuación 8. Tiempo de flujo asignado para un trabajo k .....	25
Ecuación 9. Fecha de entrega para un trabajo k .....	25
Ecuación 10. Distribución de la media muestral .....	45
Ecuación 11. Variable estandarizada en función de la media muestral .....	45
Ecuación 12. Variable estandarizada para cierta alfa .....	46
Ecuación 13. Ancho del intervalo .....	46
Ecuación 14. Varianza muestral.....	47
Ecuación 15. Tamaño de la muestra.....	47
Ecuación 16. Vector tiempos de completación .....	48
Ecuación 17. Calculo de percentil .....	50
Ecuación 18. Percentil en Excel .....	51
Ecuación 19. Fecha de entrega .....	51

## LISTA DE FIGURAS

Ilustración 1. Factores que afectan el desempeño del negocio .....	5
Ilustración 2. Comportamiento general de un modelo de simulación job shop .....	14
Ilustración 3. Procedimiento de simulación .....	15
Ilustración 4. Procedimientos para la asignación de fechas de entrega .....	19
Ilustración 5. Estructura del programa de simulación .....	28
Ilustración 6. Máquina de estados finitos para el modelo del Job Shop.....	32
Ilustración 7. Simulación del job shop .....	35
Ilustración 8. Períodos de tiempo .....	39
Ilustración 9. Estado inicial de la planta para el período actual P2 .....	40
Ilustración 10. Representación de la planta para asignación de fechas de entrega para la primera llamada .....	43
Ilustración 11. Representación de la planta para asignación de fechas de entrega para una llamada cualquiera .....	44
Ilustración 12. Distribución Normal, media .....	45
Ilustración 13. Distribución Normal, grado de confiabilidad .....	46
Ilustración 14. Procedimiento para calcular el tamaño de muestra.....	49
Ilustración 15. Pantalla inicial, interfaz Hombre-Máquina .....	52
Ilustración 16. Mensaje ejecución aleatoria.....	53
Ilustración 17. Pantalla tamaño de la muestra.....	54
Ilustración 18. Tamaño de la muestra .....	55
Ilustración 19. Datos tamaño de la muestra .....	55
Ilustración 20. Mensaje para ingresar ajuste .....	56
Ilustración 21. Mensaje fecha de entrega.....	56
Ilustración 22. Información pedido del cliente.....	57
Ilustración 23. % Retardos del 10% .....	59
Ilustración 24. Retardos/Total retardados para un 10%.....	59
Ilustración 25. % Retardos del 5% .....	60
Ilustración 26. Retardos/Total retardados para un 5%.....	60



Ilustración 27. Fechas de entrega TWK .....	63
Ilustración 28. Percentil 99% .....	64
Ilustración 29. Percentil 98% .....	64
Ilustración 30. Percentil 95% .....	65
Ilustración 31. Percentil 90% .....	66
Ilustración 32. Percentil 85% .....	66
Ilustración 33. Fechas de entrega con programación finita .....	69
Ilustración 34. Retardos/Total retardados para el percentil de 95% .....	70
Ilustración 35. Fechas de entrega para un factor de 5% y ajuste de 95% .....	71
Ilustración 36. Fechas de entrega para un factor de 10% y ajuste de 90% .....	72
Ilustración 37. Fechas de entrega para un factor de 15% y ajuste de 85% .....	72

## GLOSARIO

- Ajustable: Se dice que una asignación de fechas es ajustada cuando un porcentaje de las fechas asignadas generara incumplimiento. en nuestro proyecto, el porcentaje de incumplimientos, se podrá ajustar con un parámetro del algoritmo.
- Aleatorio: son datos generados al azar cuyo resultado no es previsible.
- Carga de la planta: es la cantidad de órdenes que tiene la planta, puede ser en espera o en proceso, para producir.
- Cola: una cola se presenta cuando un trabajo debe esperar a que una máquina se desocupe, para poder ser procesado. Es la cantidad de trabajos en fila esperando para ser procesados en una máquina.
- Corrida: es el número de simulaciones que realiza el programa.
- Due-Date: fecha de entrega
- Estado inicial: es el estado en el que se encuentra la planta al iniciar un periodo. Muestra la carga de la planta en un momento determinado.
- Factible: Una fecha de entrega factible es la que se encuentra dentro de un periodo de tiempo que puede ser cumplido.
- Fecha de entrega: es la fecha en la cual una empresa promete entregar un producto o servicio a un cliente.
- Interfaz: es el espacio en el cual el usuario interactúa con el programa.
- Job-Pool: lista de trabajos pendientes por procesar y aun no liberados al piso.
- Job-shop: conocido como taller de trabajo. Son empresas pequeñas que se encargan de la producción de productos en diferentes volúmenes que varían entre la unidad y pocas unidades de cada producto. Consiste en una fabricación no en serie, de lotes pequeños, para pedidos únicos o de pequeñas cantidades. Las operaciones son poco especializadas y los recursos son flexibles y variables.

- Retardo: es el tiempo en que la fecha de terminación de un trabajo excede su fecha de entrega.
- Tardanza: es el retraso de un trabajo.
- Tiempo de flujo: es la suma de todos los tiempos necesarios para que un trabajo sea completado, por ejemplo: tiempos de procesamiento, tiempos de cola, tiempo de llegada, etc.
- Tiempo de procesamiento: es el tiempo que toma un trabajo para ser transformado en una máquina o a lo largo de un proceso.
- Tiempo entre llegadas: es el tiempo que transcurre entre la llegada de un trabajo hasta la llegada del siguiente.
- Utilización: es el porcentaje de uso que se le da a una máquina, la máquina con mayor utilización es considerada como la máquina cuello de botella.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales retos que enfrenta toda empresa es responder de forma oportuna a los continuos cambios del mercado para poder mantener su competitividad, participación en el mercado y satisfacción de los clientes, lo cual incluye desarrollo de nuevos productos, ampliación del portafolio, mejoras continuas de sus procesos y disminución de los costos de producción. No obstante, el mayor obstáculo que presentan las compañías para superar este reto, es el conflicto interno existente entre las áreas de ventas y producción, ya que es de vital importancia que las relaciones inter-funcionales de la empresa se encuentren fortalecidas para lograr su adecuado desempeño.

El conflicto mencionado anteriormente, entre las áreas de ventas y producción, es analizado en el artículo de (Kim, Lee, & Park, 2010); según estos autores el problema se debe a que cada una de estas áreas posee diferentes metas para poder lograr el objetivo común de la empresa, donde la primera se concentra en maximizar las ganancias y la segunda, en la disminución de costos. Adicionalmente, cada área cuenta con autoridad para tomar decisiones de forma independiente, sin importar las implicaciones que pueden recaer sobre el resto de las áreas si estas decisiones no tienen en cuenta la información global del negocio.

Como se podrá ver en la revisión de la literatura una de las principales causas de este conflicto es la deficiente comunicación entre las áreas de ventas y producción. Partiendo de esta premisa, este proyecto de grado busca dar solución parcial a este problema a partir del desarrollo de un método para la asignación de fechas de entrega factibles y ajustadas, con el fin de satisfacer las necesidades del cliente y mejorar las relaciones inter-funcionales de la empresa.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar una metodología para la asignación de fechas de entrega factibles y ajustadas en sistemas Job Shop para disminuir los efectos negativos de la falta de comunicación entre las áreas de ventas y producción.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar el estado del arte de la relación entre las áreas de ventas y producción.
- Explorar los métodos estáticos y la programación finita para calcular fechas de entrega factibles propuestos en la bibliografía.
- Desarrollar un software para calcular fechas de entrega factibles utilizando un método estático y programación finita y comparar estadísticamente su desempeño.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El objetivo principal de toda empresa es lograr un alto desempeño en el mercado que le permita maximizar sus ganancias; para esto, cuenta con diferentes áreas que tienen como función optimizar las distintas operaciones y procesos que se encuentran dentro de ellas para alcanzar finalmente, y de forma conjunta, la meta empresarial. Sin embargo, el cumplimiento de este objetivo se ve truncado por conflictos internos que se generan, siendo el más reconocido el que se presenta entre las áreas de ventas y producción.

Para mitigar el conflicto entre estas áreas, en donde la comunicación juega un papel fundamental, se desarrollará una metodología para calcular fechas de entrega factibles y ajustadas. Para esto, se realizará una simulación de un sistema Job Shop que permita obtener los datos de entrada para calcular dichas fechas. Una vez se cuente con esta información, se desarrollarán dos software de programación, uno siguiendo una metodología estática, en el cual la fecha de entrega se calcula en función de las características de los trabajos y otro que se denominará programación finita, el cual tiene en cuenta la carga y la capacidad de la planta, para calcular las fechas de entrega. Finalmente, se hará una comparación entre ambos métodos para poder establecer cuál es el método que presenta un mejor desempeño.

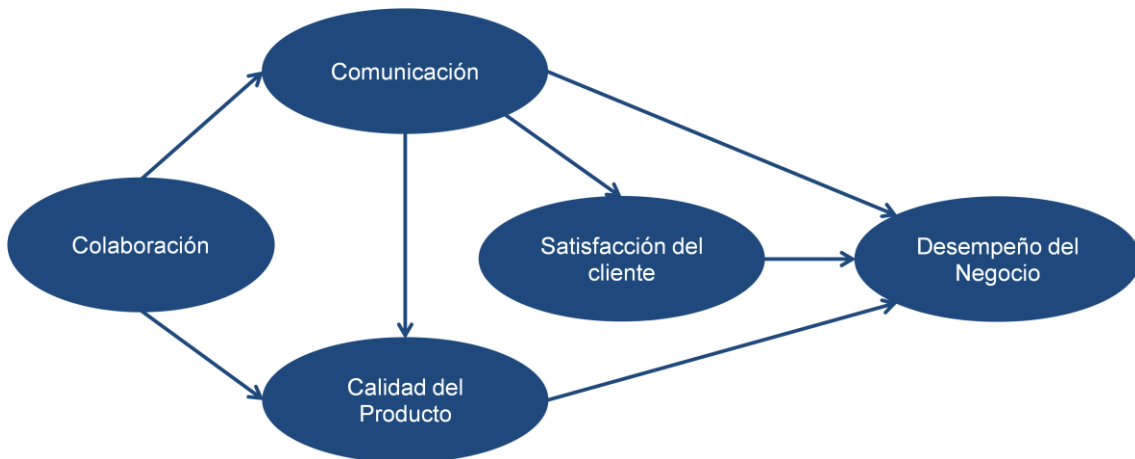
Este proyecto será de carácter netamente académico, debido a que la labor de recolección de datos en la mayoría de los casos no se realiza de forma eficiente y requiere mucho tiempo para procesarla, es decir, realizar la identificación, recolección, validación y análisis de dichos datos, y es, por esta razón, que se ha optado por obtenerlos a partir de una simulación que se acerque en la mayor medida a la realidad de un sistema Job Shop. Por lo tanto, este ejercicio académico permitirá perfeccionar la metodología que se propone, con el fin de que

a la hora que esta sea implementada en una empresa funcione de la mejor manera y se obtengan los resultados esperados.

### 3. ALCANCE

Para el buen desempeño de una empresa, tanto interno como externo, es importante que esta cuente con áreas con una cultura colaborativa y fuertes canales de comunicación. La Ilustración 1 muestra la secuencia lógica para el mejoramiento del desempeño del negocio:

Ilustración 1. Factores que afectan el desempeño del negocio



Fuente: (The effects of collaboration between marketing and production in internal and external performance, 2010)

Un ambiente colaborativo al interior de una empresa se logra a partir de una buena integración inter-funcional, para lo cual es necesario que las diferentes áreas de la compañía compartan la misma visión, objetivos, recursos e información. Una vez se alcance este estado, se obtienen beneficios en la comunicación y en la calidad de los productos. Fortalecida la comunicación, se mejora también la calidad del producto y estas en conjunto aumentan la satisfacción del cliente y el desempeño del negocio.

Debido a la complejidad del conflicto mencionado en la descripción del problema, este proyecto se centrará en el mejoramiento de la comunicación inter-funcional de una empresa, con el fin de mitigar los efectos negativos generados por el



conflicto entre las áreas de ventas y producción. Para esto, se debe tener en cuenta que para lograr una comunicación efectiva, es necesario hacer énfasis en tres puntos básicos:

- a) Reuniones regulares entre las áreas.
- b) Compartir información de productos, políticas y novedades relevantes para cualquiera de las áreas, mediante un buen sistema de información incluido el ERP.
- c) Establecer un buen sistema de comunicación entre ambas áreas.

No obstante, el alcance de este proyecto está enfocado en desarrollar una metodología para asignar fechas de entrega ajustadas y factibles, y de esta forma contribuir a este mejoramiento, lo cual corresponde al numeral *b* mencionado en la lista anterior. Cabe resaltar que este es apenas un pequeño avance para alcanzar una solución rápida y factible, ya que existen múltiples frentes de mejora por atacar y aún si se atacaran todos ellos, es poco probable que se llegue a encontrar una solución óptima del problema, debido a su naturaleza.

El entregable de este proyecto es un método estático y un modelo de programación finita que permitan definir las posibles fechas de entrega factibles y ajustadas del pedido al cliente, los cuales serán comparados entre sí con el fin de validar su funcionalidad y desempeño. Este proyecto es de tipo académico, razón por la cual los datos utilizados en éste son producto de una simulación que reúne las características básicas de un sistema Job Shop. Sin embargo el proyecto definirá las pautas para llevar a cabo dichos métodos en una empresa. Y, a partir de un análisis estadístico, demostrar cuál de los métodos es el mejor, sus beneficios y debilidades.

#### 4. REVISIÓN DE LA LITERATURA

La relación entre ventas y producción ha sido objeto de estudio en los últimos treinta años por diferentes autores, a partir de los cuales se han podido identificar posibles causas y soluciones para mitigarlo. En la Tabla 1 se muestran las causas del conflicto y en la Tabla 2 las soluciones planteadas por los autores para disminuirlo.

Tabla 1. Causas del conflicto entre producción y ventas

AUTOR	CAUSAS
(Shapiro, 1977)	Diferencias en: <ul style="list-style-type: none"><li>• Objetivos</li><li>• Remuneración</li><li>• Cultura</li><li>• Evaluación</li></ul>
(Gupta, Raj, & Wilemon, 1985)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Comunicación débil entre áreas.</li><li>• Falta de apoyo de la dirección para la integración de las áreas en el desarrollo de nuevos productos.</li><li>• Diferencias en la personalidad y la cultura del personal de ventas y producción.</li><li>• Desconocimiento sobre ventas y marketing por parte del área de producción.</li></ul>
(Powers, Sterling, & Wolter, 1988)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Inexactitud o incertidumbre en la información que fluye entre las áreas de ventas y producción para realizar las diferentes planeaciones.</li></ul>

**Tabla 1. Continuación**

<b>AUTOR</b>	<b>CAUSAS</b>
(Crittenden, Gardiner, & Stam, 1993)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Amplitud del portafolio</li> <li>• Flexibilidad</li> <li>• Calidad</li> </ul>
(Greffen & Hauser, 1996)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barreras físicas creadas por la empresa.</li> <li>• Diferencias en:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Personalidad</li> <li>• Cultura</li> <li>• Lenguaje</li> <li>• Responsabilidades en la organización</li> </ul> </li> </ul>
(Guenzi & Troilo, 2006)	Falta de: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Comunicación</li> <li>• Colaboración</li> </ul>

Fuente: elaboración propia

**Tabla 2. Soluciones al conflicto entre producción y ventas**

<b>AUTOR</b>	<b>SOLUCIÓN</b>
(Souder, 1981)	Las áreas de ventas y producción deben lograr: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena comunicación.</li> <li>• Armonía en sus relaciones.</li> </ul>
(Shaw & Shaw, 1998)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejorar la comunicación</li> <li>• Desarrollar el trabajo en equipo</li> <li>• Incrementar el entrenamiento</li> <li>• Fortalecimiento de los equipos de trabajo</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Continuación

AUTOR	SOLUCIÓN
(O'Leary-Kelly & Flores, 2002)	Promover la interacción de las áreas de ventas y producción en la toma de decisiones de temas relacionados con: <ul style="list-style-type: none"><li>• Programación</li><li>• Desarrollo de productos</li><li>• Planeación</li></ul>

Fuente: elaboración propia

Como la deficiente comunicación entre las áreas de ventas y producción es una de las principales causas del conflicto, para mitigar este problema se utilizan métodos y reglas de despacho para asignar fechas de entrega factibles y ajustadas. En el ambiente industrial asignar fechas de entrega es esencial tanto para los vendedores como para los clientes, ya que el cliente necesita una fecha de entrega para planear la utilización del producto en un tiempo futuro determinado, y la información de las fechas de entrega es una entrada significativa para la administración del sistema de ventas, ya que sirve de base para la planeación y control del sistema de producción.

Numerosas reglas de despacho han sido desarrolladas con el objetivo de definir la prioridad de cada trabajo que entra a la planta, en este proyecto se utilizarán algunas reglas a fin de programar y asignar fechas de entregas ajustadas y factibles.

Las reglas de despacho más conocidas son:

- Earliest Due-Date (EDD), es una regla que prioriza las colas de trabajo según la fecha de entrega que tenga cada uno de ellos, de tal forma que el trabajo que quede asignado tenga la fecha de entrega más cercana.

- Shortest Processing Time (SPT), esta regla asigna el trabajo en cola que posee el menor tiempo de procesamiento.
- First Come First Served (FCFS), asigna los trabajos en el mismo orden en que estos llegaron a la cola de trabajo. No requiere de ningún cálculo y en la práctica es una de las reglas más empleada en la industria.
- Longest Processing Time (LPT), esta regla asigna el trabajo en cola que posee el mayor tiempo de procesamiento.

De estos métodos tradicionales se han derivado modificaciones que mejoran el desempeño de la asignación de las fechas de entrega, algunas de éstas son:

- Regla SI\*: Esta regla fue propuesta por (Eilon, Chowdhury, & Serghiou, 1975) y es una modificación de la regla SPT. Esta regla separa los trabajos retrasados de los que no lo están y define las prioridades en cada uno de estos subconjuntos a partir de la regla SPT. El subconjunto que se considera en primera instancia es el de los trabajos retrasados, sin embargo si éste está vacío se considera el subconjunto de los trabajos no retrasados. Los autores de esta regla han reportado gran éxito en la disminución de los trabajos retrasados.
- Regla de fechas de entrega modificada MDD (Modified Due-Date): Esta regla fue propuesta por (Baker & Kanet, 1983) y es un mejoramiento de la regla EDD. En este caso, la regla modifica la fecha de entrega interna de un trabajo con la posibilidad de ser completado lo más pronto posible cuando este trabajo ya fue entregado tarde. Este estudio reporta la disminución de la tardanza.

Para la asignación de fechas de entrega, (Eilon & Chowdhury, 1976) han apuntado a la interacción entre las decisiones para establecer fechas de entrega y las decisiones de la carga de la planta. Otros estudios se concentraron en establecer los tiempos de flujo para los trabajos que llegan a la planta, con el fin de reflejar exactamente la carga de esta y los tiempos de finalización de los trabajos. Los tiempos de flujo es el periodo de tiempo desde el alistamiento de un trabajo hasta su fecha de entrega.

Los estudios anteriores emplean diferentes reglas de despacho para controlar el flujo de los trabajos a través de la planta; algunos como (Baker K. R., 1984) y (Baker & Bertrand J, 1981) se concentraron en comparar los siguientes procedimientos estáticos para asignar fechas de entrega:

- Constant allowance, (asignación constante), (CON)
- Number of Operations in a Job, (número de operaciones), (NOPS)
- Total Work Content plus a Constant Slack, (Holgura constante), (SLK)
- Allowances Proportional to Work Content, (contenido total del trabajo) (TWK)

En este estudio los trabajos fueron secuenciados de acuerdo a la regla EDD con el objetivo de asignar fechas de entrega lo más ajustadas posibles con la restricción de que ningún trabajo se retrasara. Finalmente concluyeron que los procedimientos CON y TWK eran dominantes y que el TWK usualmente produce fechas de entrega más ajustadas que el SLK.

La mayoría de modelos estáticos generalmente asumen que los tiempos de flujo son proporcionales al tiempo de procesamiento de la operación.

Por otro lado, existen otros métodos de asignación de fechas de entrega que son dinámicos. Los métodos dinámicos típicamente consideran el estado de la planta

en términos de la congestión de la estación de trabajo para establecer las asignaciones de flujo para los trabajos que llegan. La metodología estándar usada para asignar fechas de entrega con un método dinámico ha sido correlacionar las respuestas del sistema, -como por ejemplo el tiempo de flujo de las operaciones-, como una función de varias variables independientes, como la información del trabajo y del taller.

Los investigadores (Ragatz & Mabert, 1984) compararon ocho métodos diferentes para establecer las fechas de entrega con complejidades diversas. Sus métodos incluyeron análisis de regresión lineal y no lineal para predecir los tiempos de flujo de trabajo. En esta comparación se incluyen los cuatro métodos estáticos mencionados anteriormente y otros que usan información dinámica adicional como la carga de la planta para establecer las fechas de entrega. La mayor conclusión de este estudio fue que a medida que se incrementa la cantidad de información dinámica de la planta, esta información adicional pierde relevancia en la asignación de las fechas de entrega. No obstante, los parámetros de regresión usados en su estudio no controlan las fechas de entrega ajustadas y los parámetros libres pueden confundir los efectos de las decisiones en la asignación de fechas de entrega con los efectos de las fechas de entrega ajustadas.

Todas las investigaciones anteriores que usan métodos dinámicos para establecer fechas de entrega tienen una característica en común: la carga de la planta es observada al tiempo que llega una orden a la planta. En consecuencia, las fechas de entrega se asignan asumiendo que las estaciones de trabajo tendrán la misma carga de trabajo cuando el trabajo sea liberado. No obstante, pueden existir cambios en el nivel de carga de la estación de trabajo durante el tiempo en que una orden llega a la planta, y el nivel de trabajo (carga) que se usó para establecer la fecha de entrega deja de ser válido. Este supuesto común es obligatorio a menos que las prácticas de programación finita estén vigentes. Lo que se puede discernir de esta discusión es que es obvio el por qué al incrementar la

información dinámica de la carga de la planta disminuye marginalmente su utilidad: la información está desactualizada al momento de implementar la decisión.

El autor (Chang, 1997) en dos de sus artículos intenta predecir los tiempos de cola estimado para los trabajos, mostrando que los análisis estadísticos de un modelo de simulación pueden brindar una percepción invaluable del comportamiento del tiempo de flujo de los trabajos a través de las estaciones de trabajo. Una metodología similar es la de Vig y Dooley (Ramasesh, 1990), donde a partir de la recolección de la información dinámica -como el sistema de trabajo, la ruta de las colas de trabajo, el contenido del trabajo en el sistema y en las colas de las rutas- se puede predecir el flujo de trabajo con exactitud. Estas predicciones exactas conllevan a tener estimados de tiempo de flujo más confiables y por ende fechas de entrega de los trabajos más precisas.

Un problema revelado por (Vig & Dooley, 1993) acerca de la utilización de métodos dinámicos para establecer fechas de entrega, es que la información dinámica de la planta que se emplea tiende a ser más sensible a los cambios que se presenten en el ambiente que se considere tiene condiciones normales, resultando en compensaciones a favor o en contra. Ellos proponen un enfoque ponderado que combine información estática que aumente la robustez de las fechas de entrega, con información dinámica que permita aumentar la exactitud. Sus resultados sugieren la superioridad de un modelo mixto sobre los modelos dinámicos en su desempeño.

Un estudio de (Enns, 1995) propone utilizar información dinámica sobre la carga de la planta basada en un modelo de pronósticos. En este modelo, las fechas de entrega son asignadas mediante el monitoreo de la variación del error del pronóstico y con un factor de seguridad para respetar los niveles fijados de entrega y desempeño. Los resultados sugieren que para un nivel de servicio

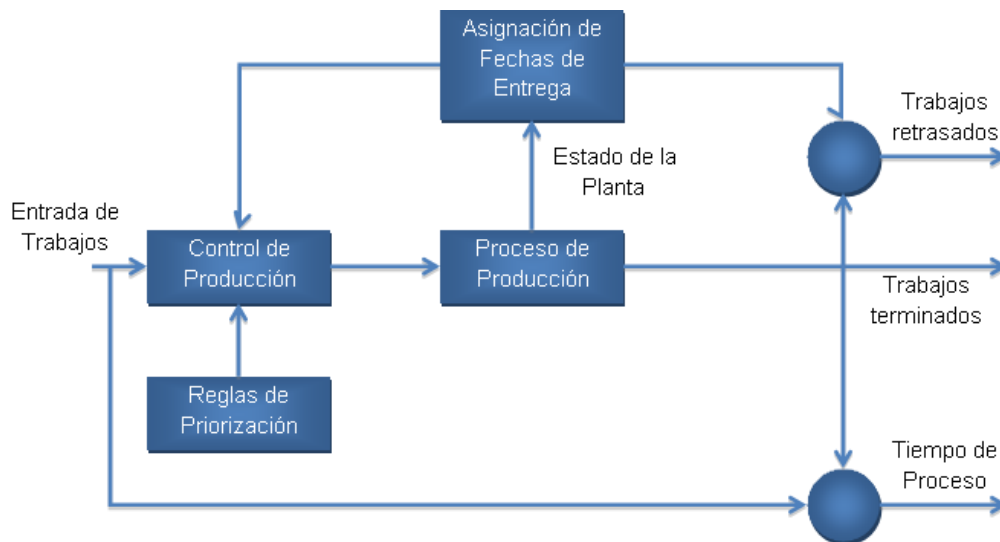


deseado, las fechas de entrega basan sus resultados de despacho en lead times mínimos.

Otros autores como (Philipoom, Rees, & Wiegman, 1994), (Ragatz & Mabert, 1984) y (Vig & Dooley, 1993), usan redes neurales en vez de un análisis de regresión para predecir fechas de entrega. Sus resultados en la asignación del flujo de la planta sugieren que un análisis con una red neural es superior a un método lineal o no lineal para el propósito de predicción. No obstante, sus diseños de experimento no mencionan un esfuerzo para controlar el ajuste de las fechas de entrega entre las diferentes reglas comparadas.

En la Ilustración 2 y en la Ilustración 3 se muestra el comportamiento general de un modelo de simulación de un Job shop. En donde los trabajos llegan a la planta aleatoriamente en intervalos de tiempo. Las características de cada trabajo son generadas en la llegada e incluye el número de operaciones, la ruta de las operaciones, orden en que es procesado el trabajo en las maquinas la ruta de las máquinas y el tiempo de procesamiento en cada máquina.

**Ilustración 2. Comportamiento general de un modelo de simulación job shop**



Fuente: (Due date selection procedures for Job-Shop simulation, 1983)

### Ilustración 3. Procedimiento de simulación



Fuente: (Due date selection procedures for Job-Shop simulation, 1983)

En el artículo de (Smith & Seidman, 1983) se hace referencia a la conclusión a la cual llegaron varios autores en la cual los estudios de simulación relacionados con los procedimientos para la asignación de fechas de entrega indican que el comportamiento de la planta y la efectividad de la reglas de despacho son afectados por el método utilizado para calcular la fecha de entrega y por el ajuste de estas. Por otro lado (Uglen, 1975) simuló un taller dinámico con nueve máquinas, en donde la ruta de cada trabajo era fija y conocida. Cuando el trabajo llegaba a la planta se generaba la fecha de entrega a partir del procedimiento de TWK y cuatro variaciones: CSU (utilización actual de la planta), CNU (número de trabajos actuales), TOP (número total de operaciones) y SPRT (suma de los tiempos de procesamiento). El resultado de este estudio sugiere que los procedimientos para calcular fechas de entrega basados en la carga actual de la planta son más efectivos para mejorar el desempeño de la planta.

Por otro lado, una simulación con ocho máquinas fue usado por (Elvers, 1973) con el fin de investigar la interacción entre el ajuste de las fechas de entrega y el desempeño de las reglas de despacho. El resultado obtenido fue que algunas reglas de despacho se comportaban mejor cuando las fechas de entrega se establecían de forma holgada mientras otras reglas de despacho se comportan mejor cuando las fechas de entrega eran ajustadas.

Cabe resaltar que en un mercado competitivo, establecer fechas de entrega ajustadas es más atractivo para los clientes que fechas de entrega holgadas. No obstante fechas de entrega ajustadas no son deseadas por el área de planeación de producción ya que las fechas de entrega ajustadas en muchos casos pueden afectar de forma negativa los requerimientos de programación y marketing. La primera descripción de este problema fue identificada por (Jones, 1973).

Finalmente, estudios de simulación por (Bertrand J., 1981) indican que utilizando la información de la carga actual de la planta y agregando una carga futura para cada máquina se reduce la variabilidad en las fechas de entrega.

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. PROCEDIMIENTOS PARA CALCULAR FECHAS DE ENTREGA

Existen tres categorías básicas que permiten clasificar los procedimientos para calcular fechas de entrega, las cuales son:

**5.1.1. Directos.** Estos procedimientos toman como datos de entrada información disponible sobre el trabajo y el estado inicial de la planta. Se dividen en:

- Asignación simple: Procedimientos que son independientes del estado dinámico de la planta o de las características de los trabajos entrantes.
- Asignación basada en la dependencia de los trabajos: Son procedimientos que se basan en la información relacionada con un trabajo específico como el tiempo de procesamiento y el número de operaciones que tiene.
- Asignación basada en el estado actual de la planta: Este tipo de procedimientos consideran el estado actual de la planta. Alguno de los factores relevantes para éstos pueden ser el número de trabajos o la utilización actual de la planta.
- Asignación combinada: Son procedimientos que combinan algunas ideas de los procedimientos mencionados anteriormente con el fin de minimizar sus deficiencias.

**5.1.2. Heurísticos.** Son procedimientos que involucran metodologías más complejas para la selección de una fecha de entrega, los cuales se basan comúnmente en una simulación inicial de la planta o en

información de una base de datos. Este tipo de procedimientos se puede dividir en:

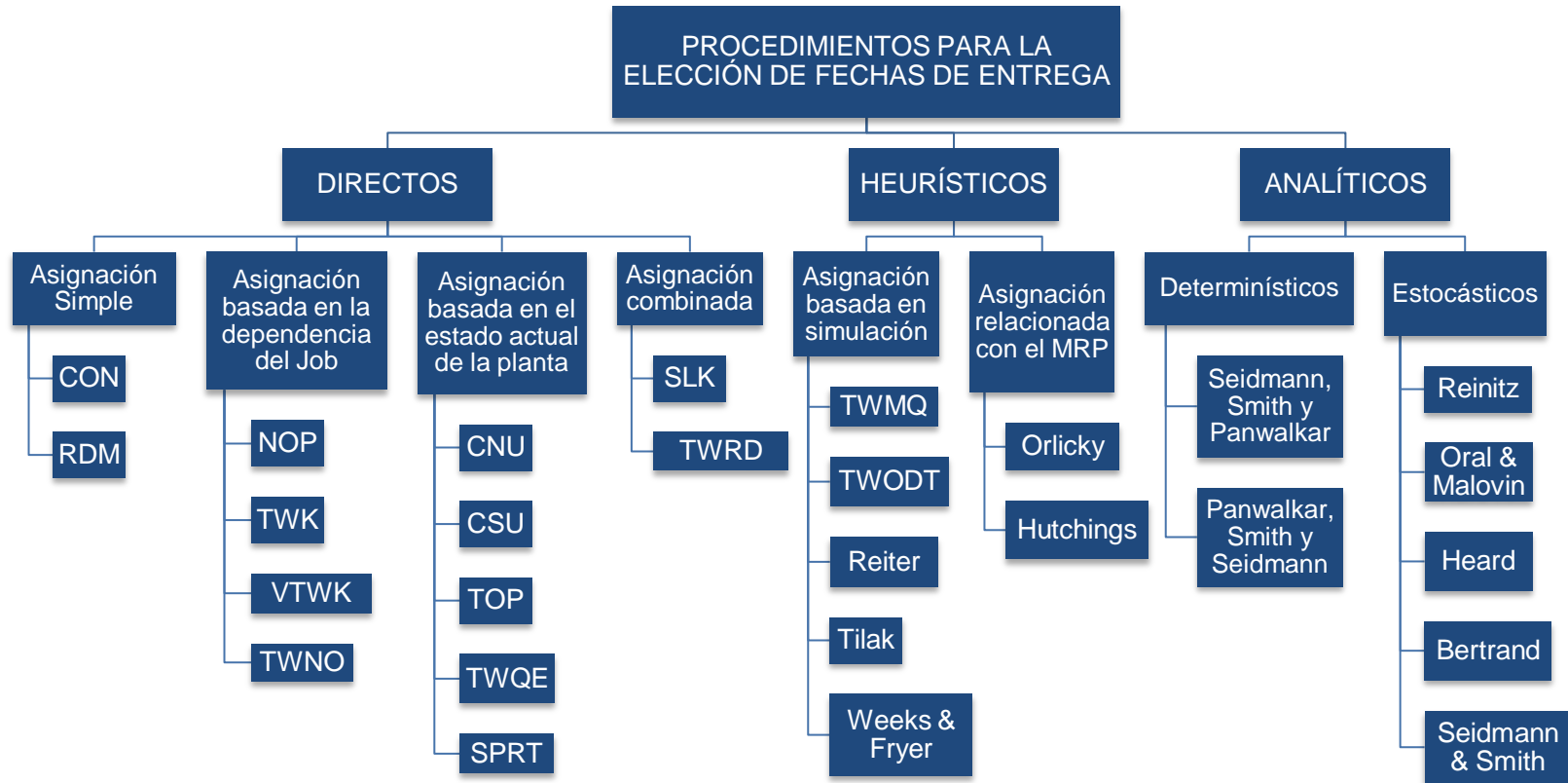
- Simulación basada en procedimientos de asignación: estos procedimientos utilizan estimaciones de cada uno de los tiempos de proceso o de retardo que son derivados de estudios de simulaciones previas.
- Procedimientos de asignación basados en la planificación de los requerimientos de materiales: Son procedimientos que tienen en cuenta los cambios en la programación de producción para asignar fechas de entrega factibles. Normalmente este tipo de procedimientos son empleados en empresas que operan con sistemas MRP para la administración de la producción y el inventario.

**5.1.3. Analíticos.** Son procedimientos que han sido desarrollados a partir de investigaciones analíticas. De los cuales se destacan:

- Determinísticos: Son procedimientos basados en resultados obtenidos en estudios sobre la programación de sistemas determinísticos estáticos y dinámicos.
- Estocásticos: Son procedimientos desarrollados para sistemas dinámicos, donde los tiempos de llegada entre los trabajos y los tiempos de procesamiento están distribuidos aleatoriamente.

En la Ilustración 4 se muestra la clasificación de los procedimientos mencionados anteriormente.

Ilustración 4. Procedimientos para la asignación de fechas de entrega



Fuente: (Due date selection procedures for Job-Shop simulation, 1983)

Donde:

- CON: common allowance (asignaciones comunes)
- RDM: random allowance (asignación aleatoria)
- NOP: number of operations (número de operaciones)
- TWK: total work (trabajo total)
- VTWK: variant of TWK (variación del trabajo total)
- TWNO: total work and number of operations (trabajo total y número de operaciones)
- CNU: current number of jobs (número de trabajos actuales)
- CSU: current shop utilization (utilización actual)
- TOP: total number of operations (número total de operaciones)
- TWQE: total work and jobs in queue (trabajo total y trabajos en cola)
- SPRT: sum of the processing times (suma de los tiempos de procesamiento)
- SLK: slack time (tiempo de holgura)
- TWRD: total work and random allowance (trabajo total y asignación aleatoria)
- TWMQ: total work and mean queue (trabajo total y cola promedio)
- TWODT: total work and operations delay time (trabajo total y tiempo de retraso en las operaciones)

## **5.2. MÉTODOS ESTÁTICOS**

Para determinar las fechas de entrega de un trabajo se determinan cuatro reglas estáticas que representan las diferentes formas de utilizar la información de un trabajo, con el fin de establecer normas para calcular los tiempos de flujo. Los tiempos de flujo es el periodo de tiempo desde el alistamiento de un trabajo hasta su fecha de entrega.

El objetivo de estos métodos, es construir una programación que cumpla con ciertos objetivos de desempeño, el principal es entregar todos los trabajos a tiempo; mientras que otro objetivo implícito es establecer fechas de entrega lo más ajustadas posibles, ya que son más atractivas para el cliente e implican un mejor servicio, teniendo en cuenta que produce menor inventario en proceso.

Estos métodos son los siguientes:

**CON:** common allowance (asignación constante). Este método da igual asignación a cada trabajo.

**Ecuación 1. Common allowance (CON)**

$$DD_i(CON) = t_{inicio} + C$$

**NOPS:** number of operations in a job (número de operaciones en un trabajo). Estima el tiempo de flujo de un trabajo en función del número de operaciones de un trabajo.

**Ecuación 2. Number of operations in a job (NOPS)**

$$DD_i(NOPS) = t_{inicio} + An_i$$

**SLK:** slack Time (tiempo de holgura). Determina la fecha de entrega basado en una holgura común (B) o tiempo de espera, la cual se adiciona a la suma de las fechas de liberación y al tiempo de procesamiento de cada trabajo.

**Ecuación 3. Slack Time (SLK)**

$$DD_i(SLK) = t_{inicio} + p_i + B$$



**TWK:** total work (trabajo total). Requiere que a cada trabajo le sea asignado un ajuste que es un múltiplo del tiempo de procesamiento de un trabajo.

**Ecuación 4. Total work (TWK)**

$$DD_i(TWK) = t_{inicio} + kp_i$$

Donde:

$k$  = factor de ajuste

$B$  = holgura constante asignada

$C$  = flujo constante asignado

$p_i$  = tiempo de procesamiento del trabajo  $i$

$n_i$  = número de operaciones del trabajo  $i$

$A$  = operación constante asignada

Dentro de las reglas, el cálculo de la fecha de entrega depende solo de la información del trabajo. En donde  $t_{inicio}$ ,  $p_i$ , denotan el tiempo de llegada y el tiempo de procesamiento del trabajo. Los factores de ajuste ( $k$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $A$ ), son diferentes para cada regla, con el fin de alcanzar un tiempo de flujo promedio. Estos factores son independientes de los tiempos de procesamiento.

**5.2.1. MÉTODO TWK.** La regla TWK es un método estático y asigna fechas de entrega de acuerdo al carácter del trabajo, es decir, que utiliza el mismo grado de ajuste para todos los trabajos basándose solamente en su información. Por ejemplo: si dos trabajos tienen los mismos tiempos de procesamientos y el mismo tiempo de llegada, la fecha de entrega será la misma para ambos, sin tener en cuenta la carga actual del taller. De acuerdo con esta regla, las fechas de entrega para un trabajo se establecen a partir de los tiempos de procesamiento, y se calcula con la Ecuación 4.

El factor de ajuste  $k$ , es seleccionado por separado para cada configuración del sistema, con el fin de alcanzar un tiempo de flujo promedio. Como se muestra en la Ecuación 4 el mismo grado de asignación es dado para todos los trabajos, basándose solamente en el total de operaciones para cada trabajo y sus respectivos tiempos de procesamiento  $p_i$ .

**5.2.2. Método DELTA.** El método delta es un método propuesto en el artículo de (Veral, 2001). En el cual se compara el desempeño del método TWK y el método propuesto. Este método demuestra la factibilidad de establecer fechas de entrega ajustadas y factibles a través del análisis de los tiempos de flujo de las operaciones, además muestra las reducciones simultáneas en la variabilidad de los lead time de manufactura, la tardanza, el porcentaje de tardanza de los trabajos y la tardanza máxima, sin recurrir a fechas de entrega más flexibles.

El método delta es estático e intenta mostrar las mejoras en el rendimiento de las fechas de entrega sin necesidad de información profunda o intensiva como en los procedimientos dinámicos. La metodología implica recolección y análisis de los datos de tiempo de flujo. Estos datos son utilizados para construir ecuaciones de regresión, usando un taller estático e información de los trabajos como: tiempos de procesamiento, promedio de utilización de las máquinas y número de operaciones, con el fin de predecir los tiempos de flujo de las operaciones. Estos tiempos son usados junto con otros parámetros con el fin de establecer el flujo de las operaciones y luego calcular las fechas de entrega.

**5.2.2.1. Metodología para establecer fechas de entrega.** La metodología utilizada para este método es un modelo cuadrático

que usa la forma simple de ecuaciones cuadráticas. A partir de la regresión es posible predecir el tiempo de flujo promedio para cada operación. Estas ecuaciones son alteradas luego añadiendo los tiempos en cola. Como cada taller tiene sus propias características, para el desarrollo de este método es necesario el análisis de los datos históricos de un taller para determinar las ecuaciones de flujo; por esta razón se utiliza una simulación de un taller que permite la recolección de los datos.

El modelo es dado por la siguiente ecuación:

**Ecuación 5. Método Delta**

$$FT_{ij} = b_0 + b_1 t_{ij} + b_2 t_{ij}^2 + b_3 \rho_j + b_4 \rho_j^2 + \epsilon_{ij}$$

En donde  $FT_{ij}$  es el tiempo promedio para cada operación  $i$  en la máquina  $j$ ,  $t_{ij}$  es el tiempo de procesamiento de la operación  $i$  en la máquina  $j$  y  $\rho_j$  es el promedio de utilización de la máquina  $j$ . Esta ecuación intenta capturar las variaciones en el sistema en diferentes trabajos en función del tiempo de procesamiento y los niveles de utilización de las máquinas. Por teoría de colas, se sabe que el tiempo en el sistema incrementa exponencialmente a la vez que la utilización aumenta. El término cuadrático  $\rho$  es incluido para capturar este efecto. Sin tener en cuenta la prioridad de la regla en efecto, cuando un trabajo llega a una máquina, si la máquina está ocupada, este tiene que esperar. El término constante en los parámetros del modelo tiene en cuenta este escenario, el cual toma una mayor importancia cuando la utilización de la máquina es alta.

El promedio de  $FT_{ij}$  a través de todas las operaciones no es igual al promedio de flujo asignado por la regla que asigna fechas de entrega, que para este proyecto es la TWK. Esta diferencia debe asignarse para preservar un ajuste constante para determinar las fechas de entrega del taller. Por lo tanto el tiempo de flujo para una operación es dado por la siguiente ecuación:

**Ecuación 6. Tiempo de flujo**

$$OA_{ij} = FT_{ij} + \delta_{ij}$$

En donde:

**Ecuación 7. Delta del tiempo de flujo**

$$\delta_{ij} = [\{\text{El tiempo de flujo asignado para } t_i \text{ en TWK}\} - \bar{F}T_{ij}]t_{ij}\bar{t}$$

Según la Ecuación 7,  $\delta_{ij}$  es utilizado como una herramienta computacional con el fin de proveer uniformidad a través de los métodos TWK y DELTA. Sin embargo  $\delta_{ij}$  puede servir como una herramienta para asignar tiempos de cola a cada operación con el fin de obtener un nivel de ajuste deseado.

El tiempo de flujo asignado para un trabajo  $k$  es calculado como la suma de todas las operaciones.

**Ecuación 8. Tiempo de flujo asignado para un trabajo  $k$**

$$JA_k = \sum_i \sum_j OA_{ij}$$

Finalmente, es posible calcular la fecha de entrega para un trabajo, sumándole al tiempo o fecha actual, el tiempo de flujo total del trabajo.

**Ecuación 9. Fecha de entrega para un trabajo  $k$**

$$DD_k = T_{actual} + JA_k$$

Luego de comparar el desempeño de este método con el TWK, (Veral, 2001) comprobó que el método DELTA presenta un mejor desempeño a través de todos los niveles de ajustes para asignar fechas de entrega, alcanza significativas mejoras en la exactitud de predicción del tiempo de flujo y obtiene un menor porcentaje de tardanza a través de diferentes reglas de despacho y condiciones.

### **5.3. PROGRAMACION FINITA**

A este método se le asigna el nombre de programación finita debido a que tiene en cuenta las condiciones reales y actuales de la planta (tales como la máquina cuello de botella, el número máximo de trabajos en cola, número de máquinas, cantidad de trabajos a procesar, la capacidad limitada, etc.), para calcular las fechas de entrega.

Según la clasificación de los procedimientos en la Ilustración 4, este método de programación finita está dentro de los procedimientos de asignación basada en el estado actual de la planta.

La programación finita busca establecer cuántos trabajos pueden ser producidos en un periodo de tiempo, teniendo en cuenta las limitaciones de los diferentes recursos. Su principal objetivo es asegurar que los trabajos se procesen de la forma más eficiente posible a través de la planta. Esta forma de programación es ampliamente empleada en manufactura, ya que permite tener en cuenta las limitaciones de los recursos y la capacidad disponible en el sistema. Los criterios de capacidad que son empleados comúnmente incluyen fecha de entrega de los trabajos, importancia del trabajo y la importancia del cliente para el fabricante.

A pesar de que la programación finita emplea las distribuciones que caracterizan los productos y el sistema de producción para establecer las fechas de entrega de igual forma que lo hacen los modelos estáticos y dinámicos, este se diferencia de los otros modelos en que utiliza el estado inicial de la planta y la demanda real para asignar la fecha de entrega, con el fin de acercarse un poco más a la realidad de la planta en un momento específico.

Actualmente existen muchos software de programación en el mercado, pero debido al alto costo del software y de la ejecución de este, se ve la necesidad de crear un programa propio basado en el estado actual de la planta. Mientras los software de programación son soluciones tradicionales que siguen las mismas estructuras básicas y contenido, los programas de simulación creados propiamente, son menos costosos y provee herramientas que pueden acomodarse exactamente a las necesidades, complejidades y requisitos de los sistemas. En la Tabla 3 se muestran los beneficios que tiene la programación finita.

**Tabla 3. Beneficios de la programación finita**

<b>Beneficios de la programación finita</b>
Acomoda diferentes reglas multi-nivel para cada recurso
Administra los límites del WIP para sistemas Kanban
Maneja sistemas con reglas de programación que envuelve procesos interdependientes
Incorpora reglas cíclicas o progresivas
Solución de menor costo que los MRP
Más fácil de crear que con los lenguajes de programación como FORTRAN, C o C++
Trabaja con sistemas de información que permite la transferencia de datos
Permite el análisis de “qué pasa si”, también como una especificación diaria de programación
Puede ejecutarse y volverse a ejecutar rápidamente en un computador

Fuente: (Creating a flexible, simulation-based finite scheduling tool, 1997)

**5.3.1. Estructura de la programación finita.** Un ejemplo de una estructura de programación finita, se muestra en la

**5.3.2. Ilustración 5** la cual fue desarrollada por “The Textile/Clothing Technology Corporation”. La estructura cuenta con cuatro entradas: definición de órdenes, definición del sistema, definiciones del producto y WIP actual. El modelo de simulación lee los datos de entrada como variables, los cuales contienen la lógica de las reglas de programación y se obtienen las siguientes salidas: desempeño estadístico del sistema, lista de despacho y tiempos de completación. Esta estructura provee seguridad para la herramienta y amplía la base de los usuarios potenciales, ya que elimina la necesidad de aprender un lenguaje de simulación.

**Ilustración 5. Estructura del programa de simulación**



Fuente: (Creating a flexible, simulation-based finite scheduling tool, 1997)

• **Definición del sistema:** el concepto básico de programación finita es definir los recursos limitados y su disponibilidad en un sistema, y programar producción con estas constantes. Cualquier proyecto de simulación comienza definiendo el sistema físico a un nivel de detalle apropiado. La definición del sistema incluye detalles como: grupos de recursos o recursos especiales, clasificación y capacidades. Este tipo de datos facilita la asignación de recursos complejos y los procesos para la selección de órdenes.

• **Definición del producto:** contiene toda la información necesaria que hace que el producto sea único o que puede ser usada en decisiones de secuencia. Incluye: la ruta del producto, tiempo de procesamiento estándar por operación e información acerca del tamaño de lotes para procesamiento y transporte.

• **Definición de órdenes y WIP:** un aspecto importante de una simulación basada en programación es que utiliza la demanda actual y el trabajo en proceso (WIP). Es posible enlazarse con los sistemas de MRP o con el sistema de ventas, con el fin de obtener las órdenes actuales de los clientes. Los datos necesarios de las órdenes son: identificación del producto, identificación de órdenes, cliente, número de lote, cantidad, fecha de entrega y prioridad. Esta información es utilizada en la simulación como un parámetro para la toma de decisiones de secuencia. Si el sistema tiene muchas restricciones basadas en las características de las órdenes, es importante ingresar dentro de las características los atributos de cada orden. Las condiciones iniciales son empezar una corrida con el sistema vacío, y continuar con un periodo de calentamiento hasta que se alcance un estado estable. El estado actual del sistema es definido por el WIP, el cual identifica la ubicación actual de cada orden y el tiempo de



procesamiento restante en la operación actual. Es necesario inicializar el modelo en un estado actual porque cada decisión en las secuencias puede depender en el estado del WIP y los recursos disponibles. La información del WIP puede ser recolectada e ingresada a mano o preferiblemente a través de un sistema de seguimiento que pueda descargar la información directamente del archivo que será leída por el modelo.

La programación finita puede ser utilizada para realizar la programación diaria de producción, como una herramienta para realizar cambios en el plan de producción, para realizar la planeación a largo plazo y como herramienta de análisis.

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. SIMULACIÓN DEL JOB SHOP BASADO EN EVENTOS

Para el desarrollo del proyecto de grado se realiza una simulación de un Job shop el cual será utilizado como un sustituto de los datos históricos de una empresa, con el objetivo de calcular fechas de entrega factibles y ajustadas.

El modelo está compuesto por seis máquinas en Job shop, cada trabajo sigue una ruta en la cual no se visita más de una vez una máquina y cada máquina tiene la misma posibilidad de estar en la ruta de un determinado trabajo. Los trabajos llegan al taller con un tiempo entre llegadas distribuido exponencialmente con una media de 25. El número de operaciones por trabajo es distribuida normalmente con una media de cuatro y una desviación estándar de uno, ningún trabajo requiere menos de tres operaciones y no más de seis. La ruta de los trabajos a través de las máquinas es determinada por asignaciones aleatorias.

Por último el tiempo promedio de procesamiento para cada máquina es distribuido exponencialmente y como resultado se obtiene la utilización para cada máquina. Los datos utilizados para el modelo se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4. Modelo del Job shop**

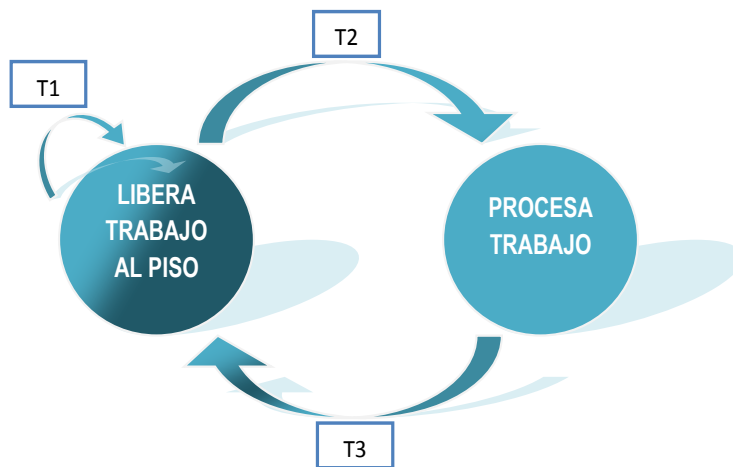
Número de máquinas	6
Ruta de trabajo	3-6 operaciones Probabilidades: 0.31 - 0.38 - 0.24 - 0.07 Media: 4
Tiempo entre llegadas de trabajos	EXP(25)
Tiempo promedio de procesamiento	EXP(22.2 – 24.4 – 26.6 – 28.8 – 31 – 33.2)
Utilización resultante por máquina	0.60 – 0.66 – 0.72 – 0.78 – 0.84 – 0.90

Fuente: (Computer simulation of due-date setting in multi-machine job shops, 2001) La descripción de este modelo puede ser encontrada en (Pritsker, 1995).

El sistema Job Shop es esencialmente una situación de colas, en donde los trabajos llegan, se enrutan en las máquinas en un orden prescrito, se procesan y luego dejan el taller.

A partir de los datos anteriores se diseña un software de programación por eventos, el cual funciona como una máquina de estados finito (MEF). Básicamente el modelo para esta situación está compuesto por dos estados y tres eventos o transiciones (T1, T2, T3). El primer estado se denomina Libera trabajo al piso y el segundo procesa trabajo. A continuación se muestra en la Ilustración 6 la máquina de estados finitos para este modelo.

**Ilustración 6. Máquina de estados finitos para el modelo del Job Shop**



Fuente: elaboración propia

El software comienza en un estado inicial en donde no ha llegado ningún trabajo, no hay trabajos en cola en ninguna máquina y todas las máquinas están vacías.

Cuando llega un trabajo, se establece el tiempo de llegada, el número de operaciones, la ruta y el tiempo de procesamiento para cada máquina. Ninguna máquina puede ser visitada más de una vez en una ruta de un trabajo. Si  $T_a < \min C_i$  (tiempo de terminación en la máquina  $i$ ), entonces se libera otro trabajo, sino se

ubica el trabajo en la cola de la máquina donde se realiza la primera operación. Si la máquina está desocupada se carga el trabajo a la máquina, si está ocupada y tiene trabajos en cola se utiliza una regla de despacho para seleccionar el trabajo a procesar cuando la máquina se libere. Cuando el tiempo de terminación es igual al tiempo de llegada, entonces se descarga el trabajo de la máquina. Cuando es la última operación el trabajo sale del piso, sino se ubica el trabajo en la cola de máquina donde se realiza la siguiente operación.

Las reglas de programación o despacho son un factor importante dentro del modelo, y se usan para determinar cual trabajo de la cola seleccionar para cargarlo en una máquina, las reglas de despacho utilizadas en este proyecto son:

- Shortest Queue at the Next Operation (SQNO) (Pinedo & Chao, 1999), esta es utilizada usualmente en Job Shops. Esta regla asigna el trabajo con la menor cola en la máquina de la siguiente operación. Una de las formas de medir el tamaño de la cola de la siguiente máquina es contabilizando el número de trabajos en espera de la máquina.
- Earliest release date (ERD) (Pinedo & Chao, 1999), esta regla es equivalente a la regla conocida como first come first served (FCFS). Esta regla minimiza la variación en los tiempos de espera de un trabajo en una máquina.
- Máquina cuello de botella, esta regla de despacho se basa en la regla SQNO cuando la cantidad de trabajos en cola es mayor que cero y cuando la máquina es el cuello de botella. Para esta regla se crean dos listas, una con los trabajos que tienen operaciones pendientes en la maquina cuello de botella y otra con los trabajos sin operaciones pendientes en la máquina cuello de botella. A partir de estas listas la regla SQNO asigna que trabajo se carga a la máquina, escogiendo el trabajo con la menor cola en la máquina de la siguiente






operación. Una de las formas de medir el tamaño de la cola de la siguiente máquina es con contabilizando el número de trabajos en espera de la máquina.

- Earliest due date (EDD), esta regla selecciona de la cola, el trabajo con la fecha de entrega más cercana.
- Shortest processing time (SPT), regla que escoge el trabajo con el menor tiempo de procesamiento.

El modelo de simulación del job shop es usado como un vehículo, con el fin de tener un escenario más realista para calcular las fechas de entrega y reemplazar el uso alternativo de datos reales históricos.

**6.1.1. Pseudocódigos.** El modelo del job shop funciona con cuatro funciones principales ver Ilustración 7, las cuales emplean la simbología de la Tabla 5 y las variables definidas en la Tabla 6:

Tabla 5. Simbología

SIMBOLO	DEFINICIÓN
	Máquina
	Trabajos a procesar en el periodo "i"
	Trabajos a procesar en el periodo siguiente "i+1"
	Trabajos virtuales para forzar el avance de la producción de la planta
	Job Pool

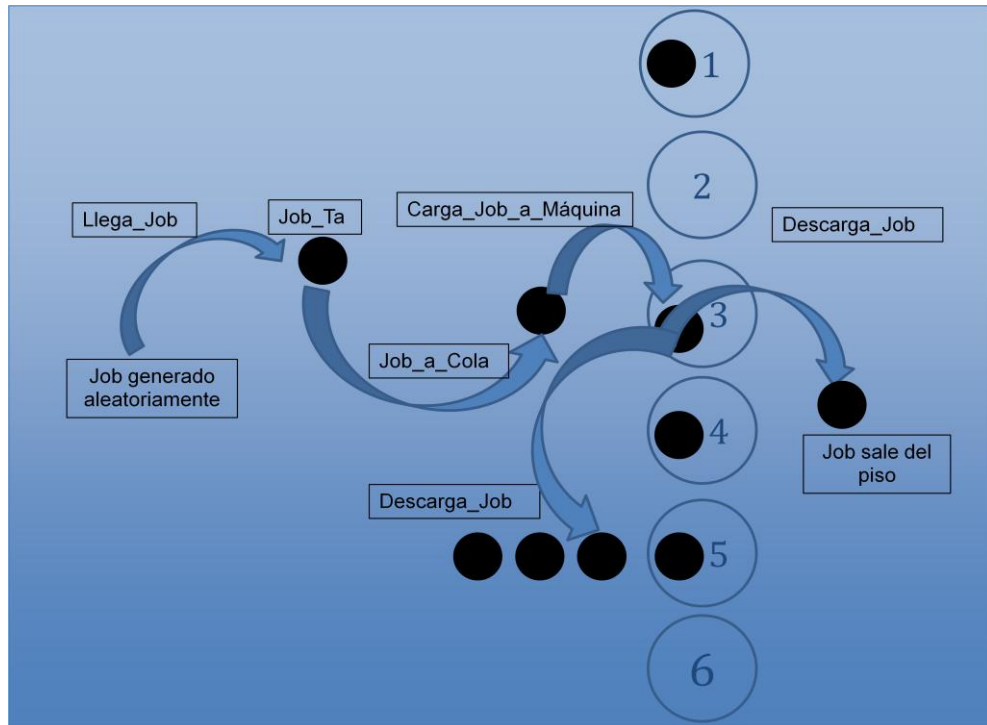
Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Variables

VARIABLES	
Ta	Tiempo de llegada
Job_Ta	Consecutivo de llegada de los trabajos
Delta_T	Tiempo entre llegadas con una distribución exponencial de 25
Cola_maqs	Número de trabajos en cola en la máquina
Cant_Jobs_Terminados	Número de trabajos terminados
Ci (maq)	Tiempo de terminación en la máquina
Cant_OP	Cantidad de operaciones

Fuente: elaboración propia

Ilustración 7. Simulación del job shop



Fuente: elaboración propia

**Llega\_Job:**

Job\_Ta= Job\_Ta (anterior) + 1

Delta\_T= EXP (25)

Ta= Ta (anterior) + Delta\_T

Genera la cantidad de operaciones de forma aleatoria (entre 3 y 6), teniendo en cuenta un control para que ninguna máquina se repita dentro de la ruta de un trabajo.

Genera la ruta y el tiempo de procesamiento para el Job\_Ta

**Control\_maq:**

control\_maq(maq)= 0

Para Operación= 1 hasta Cant\_OP

    maq= entero (aleatorio x Cant\_OP)+1

    Mientras control\_maq(maq)= 1

        maq= entero (aleatorio x Cant\_OP)+1

    Fin mientras

    control\_maq(maq)= 1

    Calcula tiempo de procesamiento

Fin para

**Job\_a\_cola:**

Ubicar el Job\_Ta en la cola de la máquina donde se realiza la primera operación.

Cola\_maqs= Cola\_maqs + 1 (incrementa la cantidad de trabajos en la cola de la máquina)

Si la máquina está desocupada, entonces Carga\_Job\_a\_máquina

### **Descarga\_Job:**

Si la operación de un Job\_Ta es menor o igual a la cantidad de operaciones totales, entonces ubica el Job\_Ta en la cola de la máquina de la siguiente operación. Se incrementa la cola de la máquina.

Si la máquina de destino está desocupada, entonces carga Job\_a\_máquina.

Si no, finaliza procesamiento del trabajo (sale del piso ya fabricado)

Almacena los datos para graficar colas vs tiempo.

### **Carga\_Job\_a\_máquina:**

Si la máquina está desocupada y la cantidad de trabajos en cola es mayor que cero, entonces retira el trabajo de la cola.

Procesa trabajo en máquina

$C_i(\text{maq}) = \text{Tiempo de inicio} + \text{Tiempo de procesamiento}$

Si no, no se carga trabajo a la máquina.

## **6.2. MÉTODOS ESTÁTICOS**

El método estático utilizado para asignar fechas de entrega factibles y ajustadas es el método TWK, el cual fue ejecutado bajo la regla de despacho SPT. Este proyecto de grado se enfocará en el método TWK como *benchmark*, debido a que su uso es muy amplio en la mayoría de los estudios de programación simulada y además presenta un mejor desempeño para calcular fechas de entrega ajustadas, (Veral, 2001), (Baker K. R., 1984) y (Baker & Bertrand J, 1981).



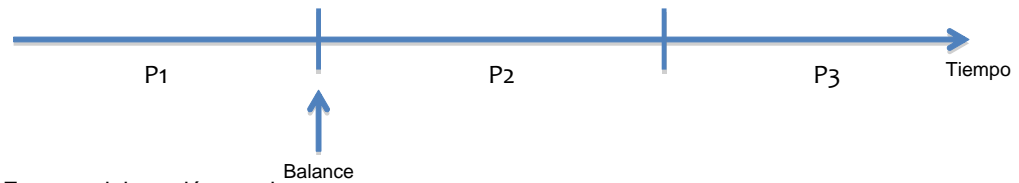
Para aplicar este modelo se utiliza la simulación del job shop y los datos de entrada de la Tabla 4. El modelo realiza varias repeticiones y en cada una se liberan 8000 trabajos, los 2000 trabajos iniciales son descartados ya que equivalen al tiempo de precalentamiento y los 6000 trabajos restantes son utilizados para calcular los tiempos de flujo. Por otro lado, se emplea el porcentaje de trabajos retardados como un dato de entrada adicional del modelo, el cual puede ser ajustado con diferentes porcentajes de retardo, por ejemplo: 5%, 10% y 15%. El factor de ajuste se calcula de acuerdo al porcentaje de trabajos retardados que se defina; el cual junto con el tiempo de inicio para cada trabajo y los tiempos de procesamiento para cada máquina permiten calcular la fecha de entrega con la Ecuación 4.

### **6.3. PROGRAMACIÓN FINITA**

**6.3.1. Definiciones y símbolos.** Para explicar adecuadamente el funcionamiento de la programación finita, es importante tener claridad en los períodos de tiempo que serán mencionados a lo largo de este capítulo, los cuales se dividen en tres y pueden ser visualizados en la Ilustración 8:

- Período anterior (P1)
- Período actual (P2)
- Período siguiente (P3): Es el período al cual se le determinarán las fechas de entrega.

**Ilustración 8. Períodos de tiempo**



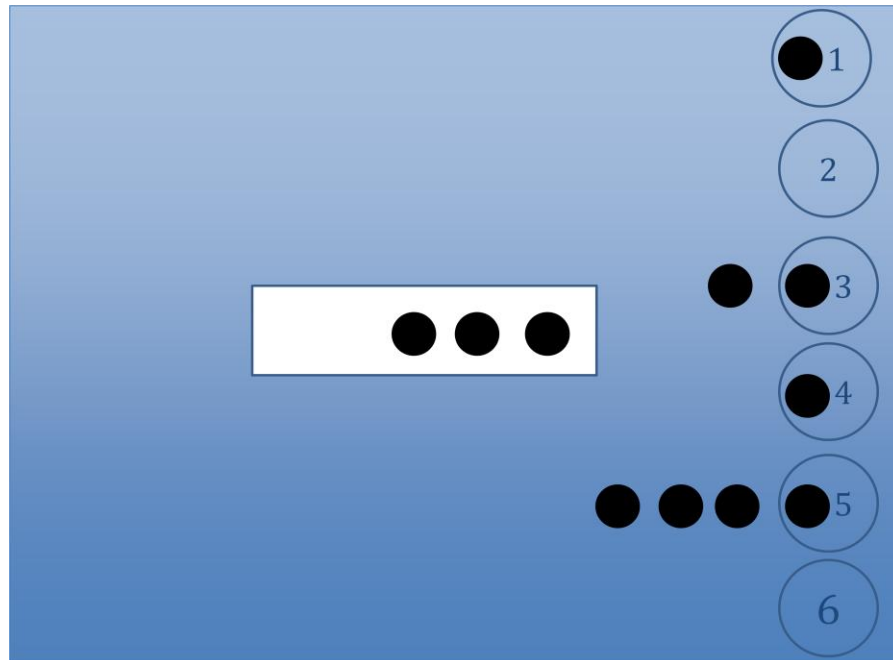
Fuente: elaboración propia

### **6.3.2. Datos de Entrada**

**6.3.2.1. Distribuciones estadísticas para la caracterización de los productos (trabajos) y el Sistema de Producción.** El sistema de producción de planta que se empleará en el modelo de este proyecto se muestra en la Tabla 4.

**6.3.2.2. Estado Inicial de la planta para comenzar a producir los trabajos programados para el período actual P2.** Para este proyecto de grado, el estado inicial de la planta para el periodo actual P2, corresponderá al estado en el que finalizó la producción para el periodo anterior P1. La Ilustración 9 muestra el estado inicial de la planta para el periodo actual P2.

**Ilustración 9. Estado inicial de la planta para el período actual P2**



Fuente: elaboración propia

Según la simbología definida en la Tabla 5, la Ilustración 9 muestra que las máquinas 1, 3, 4 y 5 están procesando un trabajo, la máquina 3 tiene un trabajo en cola, la máquina 5 tiene tres trabajos en cola y las máquinas 2 y 6 se encuentran libres. Por otro lado, los trabajos que se encuentran en el Job Pool indican que no han sido liberados a piso.

Para poder obtener la información anterior en una empresa, se propone que el operario de cada máquina lleve un registro de las operaciones con los siguientes datos: tiempo de inicio, tiempo de terminación, identificación del trabajo, operación y máquina.

Este formato se denomina registro de operaciones y se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Registro de operaciones

TRABAJO	OPERACIÓN	MÁQUINA	TIEMPO DE INICIO	TIEMPO DE TERMINACIÓN
1	1	2	06:00:00 a.m.	08:30:00 a.m.
7	4	2	09:18:00 a.m.	10:48:00 a.m.
15	3	2	08:38:38 a.m.	09:14:38 a.m.

Fuente: elaboración propia

El adecuado procesamiento de la información recopilada en los registros de operaciones por máquina permite calcular el tiempo de finalización de las máquinas, los trabajos en cola y el Job pool.

### 6.3.2.3. Estado Final de la planta al terminal el período actual P2.

Debido a las variaciones normales en un sistema de producción – tiempos de procesamiento variables, fallas de maquinaria, etc.- el estado final de la planta al terminar el período actual P2 no se puede calcular con exactitud. Sin embargo, se tratará de estimar utilizando las funciones descritas en el numeral 6.1.1., liberando al piso la totalidad de los trabajos contenidos en el Job Pool inicial, y luego se irán liberando los trabajos programados a la producción en el período P2 hasta que el tiempo transcurrido en la simulación sea igual a la duración del período P2. Los trabajos no liberados al piso serán el nuevo Job Pool inicial y el estado inicial de la planta se calcula acorde al numeral 6.3.2.2.

### 6.3.2.4. Asignación de fechas de entrega para trabajos a programar en el período P3.

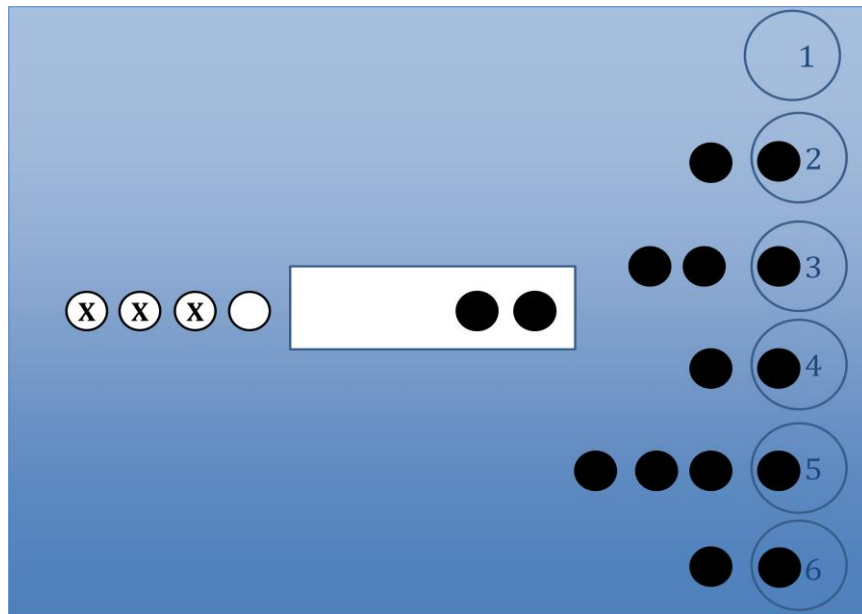
A manera de ejemplo, en la Ilustración 10 se muestra el nuevo estado inicial que tendría la planta al finalizar el período P2, es decir, el estado estimado por simulación que tendría la planta cuando llama el primer cliente del período P3. La máquina 1 está libre, las máquinas 2, 4 y 6 están procesando un trabajo y tienen otro trabajo en cola, la máquina 3

está procesando un trabajo y tiene dos trabajos en cola y la máquina 5 está procesando un trabajo y tiene tres trabajos en cola. En el Job Pool tenemos dos trabajos aún no liberados al piso.

Para calcular la fecha de entrega del trabajo de la primera llamada, se libera al piso los dos trabajos contenidos en el Job Pool inicial, luego se libera al piso el trabajo de la llamada y se generan trabajos virtuales, a partir de las distribuciones características de la planta, con el fin de forzar el avance de la producción en la planta hasta que el trabajo de la llamada salga del piso y luego el tiempo de completación del trabajo (fin procesamiento de su última operación) se almacena en un vector de longitud  $K$ , se repite este procedimiento  $K$  veces.

La fecha de entrega calculada será un estadístico, de este vector. Para este caso se utilizan los percentiles, ya que el percentil es usado dentro de la estadística descriptiva como medida de posición no central y permite calcular la fecha de entrega con la confiabilidad deseada (ejemplo 95%).

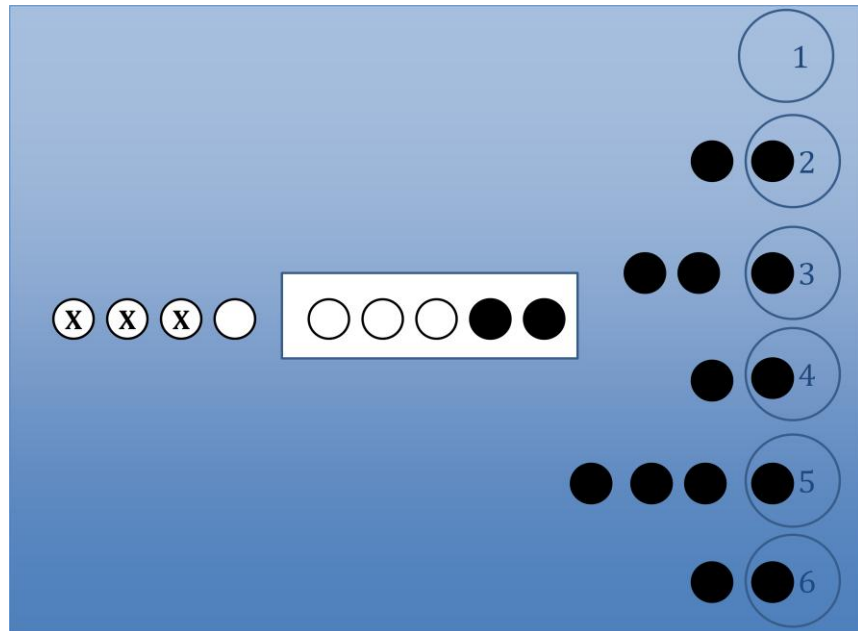
**Ilustración 10. Representación de la planta para asignación de fechas de entrega para la primera llamada**



Fuente: elaboración propia

Si el cliente reserva el trabajo, este adiciona al Job Pool, tal como lo muestra la Ilustración 11, de tal forma que al recibir una nueva llamada simplemente se repite el procedimiento anterior, asignando la totalidad de trabajos contenidos en el Job Pool.

Ilustración 11. Representación de la planta para asignación de fechas de entrega para una llamada cualquiera



Fuente: elaboración propia

## 6.4. TAMAÑO DE LA MUESTRA

Debido a la naturaleza probabilística de los sistemas donde se utiliza simulación y más en este caso que se utilizan datos aleatorios, es necesario encontrar el número óptimo de simulaciones para obtener un resultado confiable. Por esta razón para calcular la fecha de entrega de un trabajo, es importante saber cuántas corridas son necesarias con el fin de tener una muestra de datos representativa.

**6.4.1. Teorema central del límite:** Sea  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  una muestra aleatoria de una variable  $X$ , que tiene media  $\mu$ , varianza  $\sigma^2$  y una función generadora de momentos f.g.m  $M_X(t)$ , entonces

**Ecuación 10. Distribución de la media muestral**

$$\bar{X} \sim N(\mu, \sigma^2/n)$$

Donde:

$\bar{X}$  = media muestral.

$n$  = tamaño de la muestra.

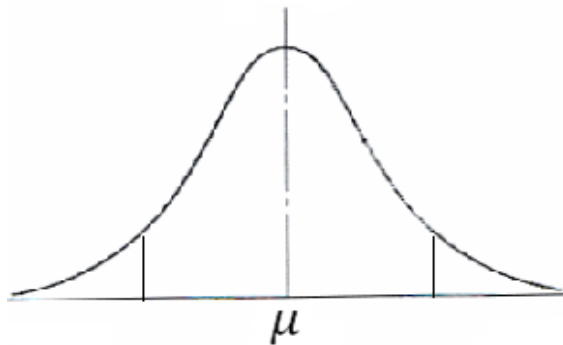
**Ecuación 11. Variable estandarizada en función de la media muestral**

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma} \times \sqrt{n} \sim N(0,1)$$

Donde:

$Z$  = estadístico normal estándar.

**Ilustración 12. Distribución Normal, media**



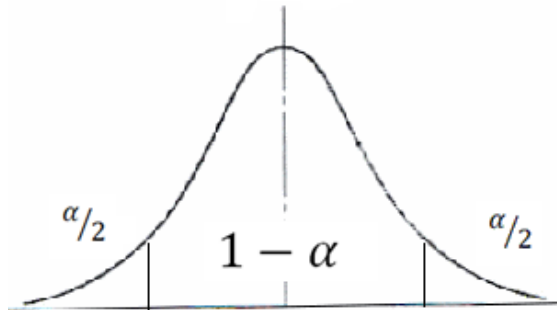
Fuente: elaboración propia

$$P\left(\frac{X_0 - \mu}{\sigma} \times \sqrt{n} \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma} \times \sqrt{n} \leq \frac{X_1 - \mu}{\sigma} \times \sqrt{n}\right) = 1 - \alpha$$

GRADO DE CONFIABILIDAD



**Ilustración 13. Distribución Normal, grado de confiabilidad**



Fuente: elaboración propia

**Ecuación 12. Variable estandarizada para cierta alfa**

$$Z_{\alpha/2} = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma} \times \sqrt{n}$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$  = estadístico normal estándar para cierta alfa.

**Ecuación 13. Ancho del intervalo**

$$AI = \bar{X} + \frac{L}{2} - \bar{X} + \frac{L}{2}$$

$$AI = L$$

$$L = 2 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \times Z_{\alpha/2}$$

$$\sqrt{n} = \frac{2 \sigma Z_{\alpha/2}}{L}$$

$$n = \frac{4 \sigma^2 Z_{\alpha/2}^2}{L^2}$$

Donde:

$AI$  = ancho del intervalo.

$L$  = intervalo de la media.

Como la desviación estándar  $\sigma$  no se tiene, se utilizará la varianza muestral  $S^2$ . Sea  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  una muestra aleatoria de una variable  $X$  con  $n$  valores:

**Ecuación 14. Varianza muestral**

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

**Ecuación 15. Tamaño de la muestra**

$$n = \frac{4 S^2 Z_{\alpha/2}^2}{L^2}$$

**6.4.2. Algoritmo de funcionamiento.** Para calcular el tamaño de muestra se necesitan los siguientes parámetros de entrada:  $Z_{\alpha/2}$  y  $L$

En donde:

$L$  : Intervalo de la media. Para este caso se utilizará un valor de 0,1 (10%). Dependiendo de la variabilidad que se genere en la simulación de los datos, este podrá ser modificado.

$Z_{\alpha/2}$  : Estadístico normal estándar para cierta alfa. Si se quiere trabajar con una confiabilidad de 95% ( $\alpha=5\%$ ), el valor es 1,9599.

La secuencia que se debe seguir en la ejecución del programa para calcular el tamaño de muestra es la siguiente:

- Para calcular un tamaño de muestra que permita establecer cuántas corridas son necesarias para determinar una fecha de entrega, se toma como tamaño de muestra inicial el valor  $n_0$ , el cual debe estar entre 20 y 30 corridas (Azarang & García Dunna, 1996). Para este caso específico se utilizará 30.
- El proceso de simulación inicia con la llamada del cliente, en donde se genera un trabajo con tiempo de llegada  $T_a$ ; este trabajo será definido como  $Job\_T_a$ . Para poder establecer la fecha de entrega del  $Job\_T_a$ , es necesario generar trabajos aleatorios que empujen los trabajos que están en proceso y el  $Job\_T_a$  a través de todo el proceso hasta salir del piso. Este proceso se repite treinta veces y cada una de las repeticiones será considerada como una corrida. Cada corrida genera un tiempo de completación y se almacenará en un vector.

**Ecuación 16. Vector tiempos de completación**

$$Vector = [TC_1, TC_2, TC_3, \dots, TC_{n_0}]$$

Donde:

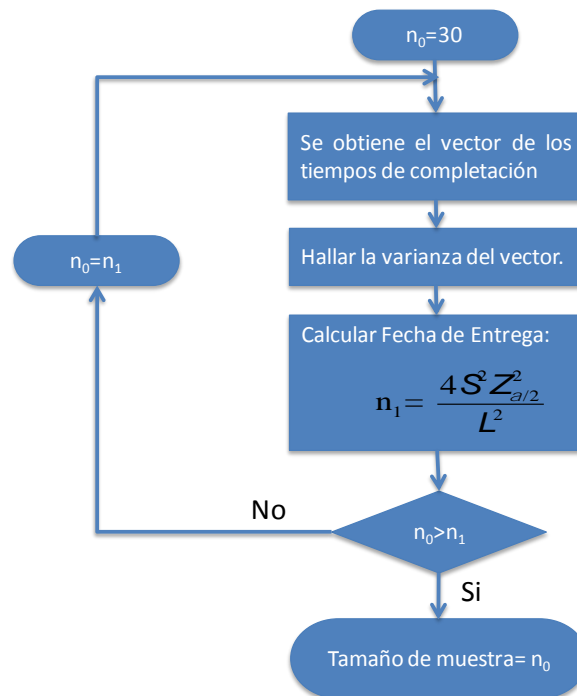
$TC_n$  = tiempo de completación para cada corrida.

- Una vez se tenga el resultado de cada corrida, se halla la varianza ( $S_0^2$ ) de este vector.

- Para calcular el tamaño de muestra con el cual se establecerá las fechas de entrega, es necesario utilizar la Ecuación 15 mencionada al comienzo de este capítulo.
- Se tomará un criterio de tolerancia que permita establecer un ciclo para determinar cuándo se halla el tamaño de muestra adecuado. Este criterio está dado por la siguiente afirmación: si  $n_0 > n_1$ , se tomará el valor de  $n_0$  como el tamaño de muestra, sino,  $n_0$  toma el valor de  $n_1$  ( $n_0 = n_1$ ), y se repite este procedimiento hasta que se cumpla la condición mencionada anteriormente.

En la Ilustración 14 se muestra el procedimiento descrito previamente para calcular el tamaño de muestra.

**Ilustración 14. Procedimiento para calcular el tamaño de muestra**



Fuente: elaboración propia

## 6.5. CÁLCULO FECHA DE ENTREGA

Para calcular la fecha de entrega para el trabajo del cliente, debemos primero calcular el tamaño de la muestra, el cual nos indica el número de corridas necesarias para tener una muestra representativa. A partir de estos valores se calcula la media muestral  $\bar{X}$  la cual, según el Teorema Central del límite, tiene aproximadamente una distribución normal, ver Ecuación 10.

Sin embargo, como no se puede asegurar que los datos se comportan también de forma normal, para calcular la fecha de entrega con cierta confiabilidad se utilizan los percentiles.

El percentil es usado dentro de la estadística descriptiva como medida de posición no central, la cual permite conocer puntos característicos de la distribución que no son los valores centrales. Los percentiles dividen la distribución en cien partes, y se representan con la letra  $P$ . Para calcular el percentil se utiliza la Ecuación 17:

**Ecuación 17. Calculo de percentil**

$$x = \frac{n \times i}{100}$$

En donde  $n$  es el tamaño de la muestra, y el  $i$  es el percentil en donde el  $i\%$  de la muestra son los valores menores que él y  $100 - i\%$  restantes son mayores. El resultado de esta operación da un número real con parte entera  $E$  y parte decimal  $D$ , con estos dos valores se aplica la siguiente función.

$$P_i = \begin{cases} \text{elemento } (E + 1), & \text{para } D \neq 0 \\ \frac{\text{elemento } E + \text{elemento } (E + 1)}{2}, & \text{para } D = 0 \end{cases}$$

El resultado de esta operación es el percentil pedido.

Para realizar esta operación en Excel se utiliza la siguiente función:

**Ecuación 18. Percentil en Excel**

$$= PERCENTIL(matriz; k)$$

Por lo tanto para calcular la fecha de entrega se utiliza la Ecuación 19:

**Ecuación 19. Fecha de entrega**

$$Fecha\ de\ entrega = PERCENTIL(Vector; k)$$

Donde:

*Vector*= son los tiempo de completación para cada corrida de un trabajo.

*k*= es el valor del percentil en el intervalo de 0 a 1, en donde 1 equivale a 100%.

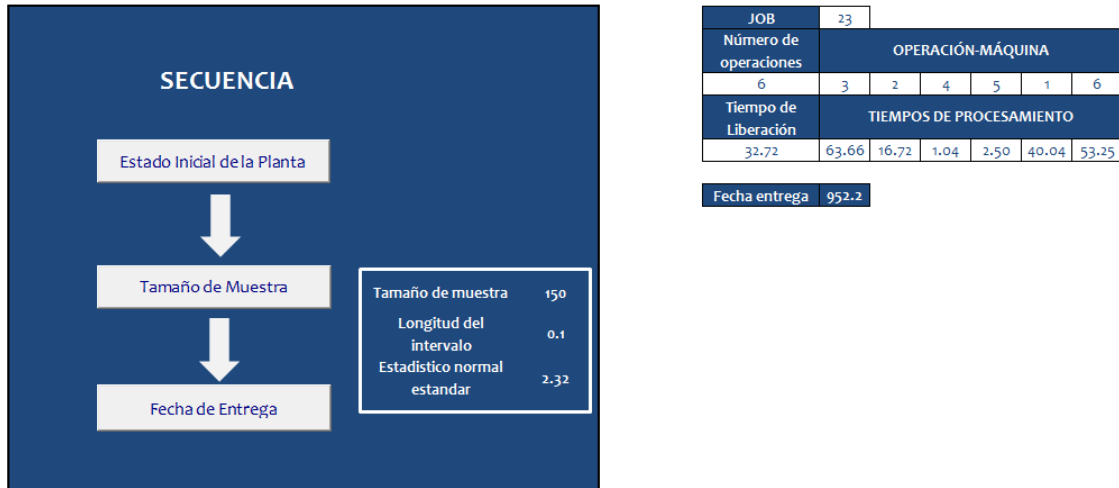
Este valor permitirá ajustar el cálculo de las fechas de entrega y será denominado como el ajuste.

## **6.6. FUNCIONAMIENTO INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA DE LA PROGRAMACIÓN BASADA EN SIMULACIÓN**

Para calcular la fecha de entrega de un trabajo, se ha desarrollado una interfaz que facilite la ejecución del programa de forma ordenada y amigable para el usuario.

La interfaz hombre-máquina está dividida en dos secciones: la primera corresponde a la secuencia de ejecución de los programas, en donde se encuentran los botones con los cuales se corre el programa; y la segunda, a la información relacionada con los pedidos del cliente y la fecha de entrega. En la Ilustración 14 se puede apreciar la pantalla inicial de dicha interfaz.

Ilustración 15. Pantalla inicial, interfaz Hombre-Máquina



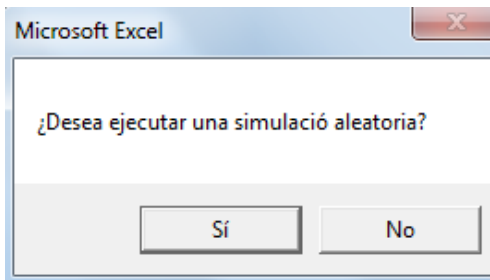
Fuente: elaboración propia

**6.6.1. Pasos para ejecutar el programa.** En la secuencia se encuentran los siguientes botones:

**6.6.1.1. Estado Inicial de la planta.** Como su nombre lo indica, permite simular el estado inicial de la planta al finalizar el periodo P1. Para esto toma como datos de entrada los siguientes archivos de texto:

- **Datos\_P1:** trae los datos del modelo del job shop, (Tabla 4) como la probabilidad de que ocurra una ruta de trabajo, el tiempo entre llegadas y los tiempos promedios de procesamiento para cada máquina.
- **Parametros\_P1:** dentro de este archivo se encuentra la máquina cuello de botella y la cantidad de trabajos a terminar. Al oprimir este botón emerge un mensaje (ver Ilustración 16) en el cual el usuario selecciona que tipo de simulación desea ejecutar:

Ilustración 16. Mensaje ejecución aleatoria



Fuente: elaboración propia

- **Aleatoria:** se obtienen diferentes estados iniciales de la planta en cada corrida. (Pinedo & Chao, 1999)
- **No aleatoria:** se mantiene el estado inicial de la planta, sin importar el número de corridas que se realicen.

Luego de seleccionar que tipo de simulación ejecutar, el programa comienza a generar pedidos con el fin de pasar un tiempo de calentamiento para poder realizar el balance y generar el job pool, y así obtener el estado inicial de la planta para el periodo P2. El resultado que se obtiene son una serie de archivos de texto que sirven como entrada para otras funciones, siendo los siguientes los más relevantes:

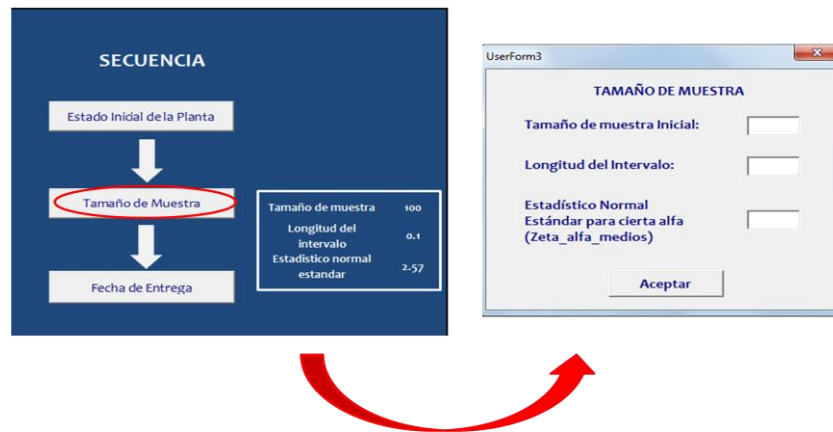
- Gantt: este archivo tiene la información de los trabajos, tales como tiempo de inicio, tiempo de finalización, número de trabajo y máquina.
- Maq\_Job: archivo que muestra el número de operaciones de cada trabajo y las máquinas por donde estas se llevan a cabo.



- P\_Job: archivo de texto en el cual está el tiempo de liberación del trabajo a piso y los tiempos de procesamiento en cada operación para dicho trabajo.

**6.6.1.2. Tamaño de Muestra.** Al oprimir este botón el programa solicita los siguientes datos de entrada que requiere que sean definidos por el usuario para calcular el tamaño de la muestra: tamaño de muestra inicial, longitud del intervalo y el estadístico normal estándar. Adicionalmente para ejecutarse toma como datos de entrada los archivos generados en el estado inicial de la planta. En la Ilustración 17 se muestra la pantalla que aparece para realizar este paso.

**Ilustración 17. Pantalla tamaño de la muestra**

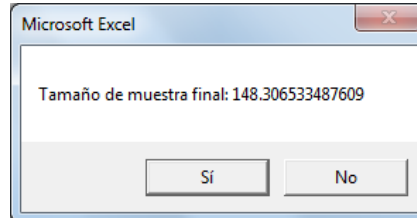


Fuente: elaboración propia

El cálculo del tamaño de muestra se realiza de forma iterativa, hasta que se encuentre el tamaño de muestra ideal para calcular las fechas de entrega factibles, para este caso se estableció que el tamaño es adecuado cuando el resultado sea un valor menor al ingresado en el tamaño de muestra inicial. Cada vez que se calcula el tamaño de muestra se genera un mensaje con el valor

hallado y se pregunta si se desea o no aceptar dicho valor, tal como se muestra en Ilustración 18.

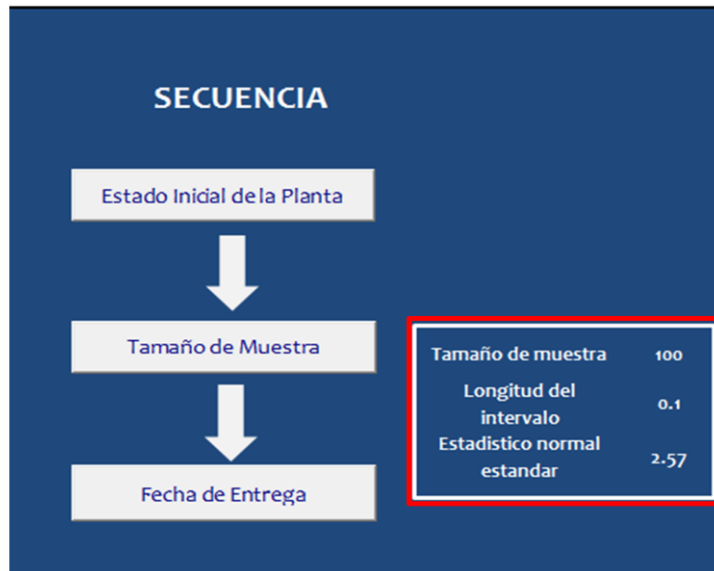
**Ilustración 18. Tamaño de la muestra**



Fuente: elaboración propia

En caso de no aceptar se repite de nuevo este procedimiento, en caso de aceptar, la información de los parámetros que se ingresaron para calcular el tamaño de muestra se registran a la derecha de dicho botón, tal como se muestra a continuación en la Ilustración 19.

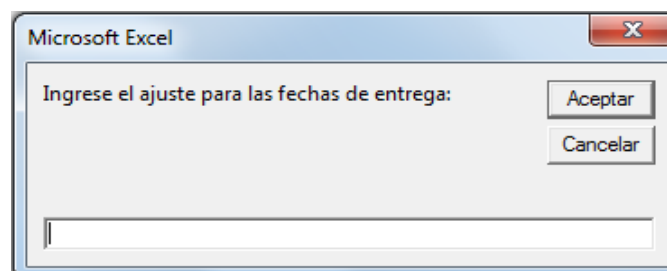
**Ilustración 19. Datos tamaño de la muestra**



Fuente: elaboración propia

**6.6.1.3. Fecha de Entrega:** Este es el último botón en ejecutarse y permite calcular la fecha de entrega para el trabajo del cliente, según el ajuste que se desee. Este último dato, se digita en el siguiente cuadro de mensaje, Ilustración 20.

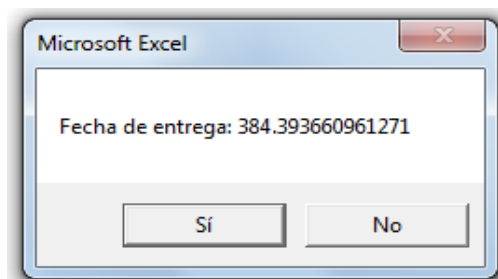
**Ilustración 20. Mensaje para ingresar ajuste**



Fuente: elaboración propia

Una vez ingresado el ajuste, se ejecuta la función “calcula fecha de entrega”, la cual a partir de este calcula el percentil para los tiempos de completación generados en las diferentes corridas y de esta forma establecer la fecha de entrega factible y ajustada que le será entregada al cliente, este dato aparece en un mensaje como el que se muestra en la Ilustración 21:

**Ilustración 21. Mensaje fecha de entrega**



Fuente: elaboración propia

La información sobre el pedido del cliente y la fecha de entrega asignada se muestran en la segunda sección de la interfaz, Ilustración 22

**Ilustración 22. Información pedido del cliente**

**INFORMACIÓN PEDIDO DEL CLIENTE**

<b>JOB</b>	23					
<b>Número de operaciones</b>	<b>OPERACIÓN-MÁQUINA</b>					
6	3	2	4	5	1	6
<b>Tiempo de Liberación</b>	<b>TIEMPOS DE PROCESAMIENTO</b>					
32.72	63.66	16.72	1.04	2.50	40.04	53.25
<b>Fecha entrega</b>	952.2					

Fuente: elaboración propia

En caso de aceptar la fecha de entrega generada por el sistema, el programa muestra en la segunda sección de la interfaz la información del siguiente pedido y calcula su fecha de entrega. Si no se acepta, el programa se detiene y se mantiene en pantalla la información y fecha de entrega del último trabajo.

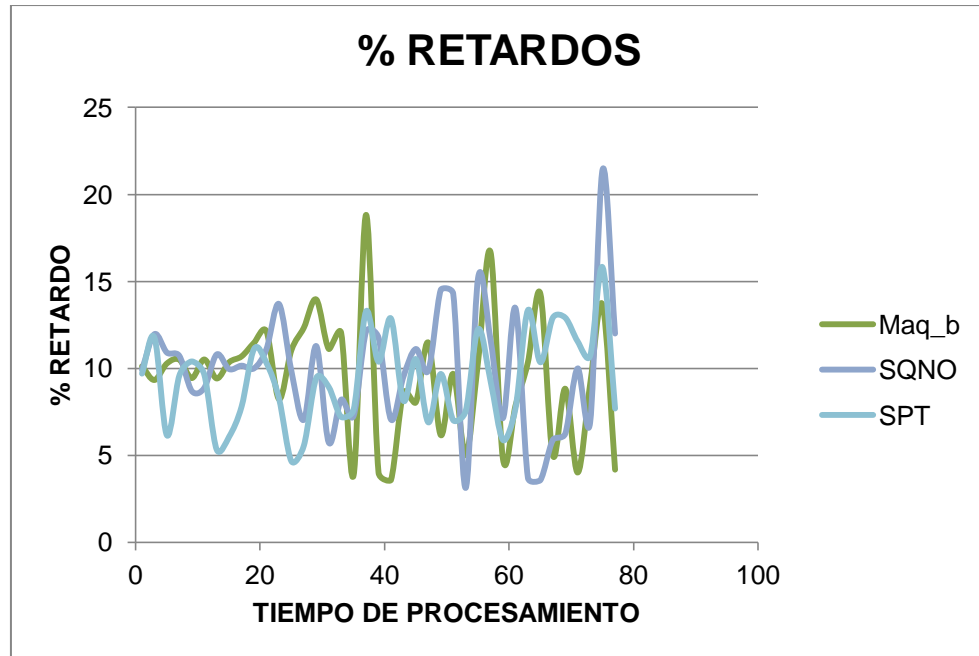
## 7. RESULTADOS

### 7.1. MÉTODOS ESTÁTICOS

**7.1.1. Comportamiento métodos estáticos.** Para corroborar los resultados obtenidos por (Veral, 2001) , se realizaron dos simulaciones para observar el comportamiento de los métodos estáticos, una teniendo en cuenta un 5% de retardos y otra con un 10%.

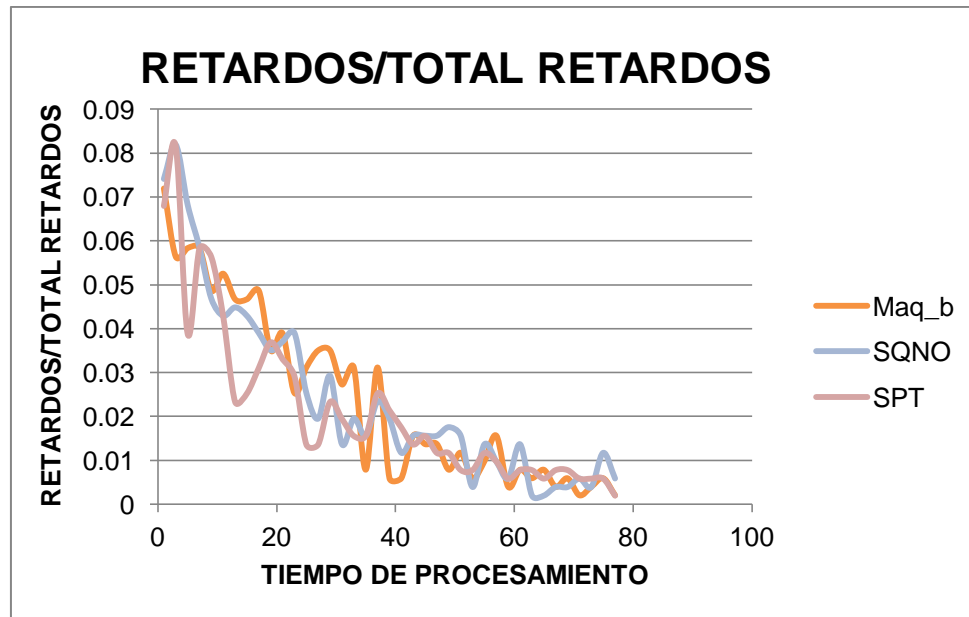
La Ilustración 23 y la Ilustración 24 muestran los resultados obtenidos con el método TWK el porcentaje de trabajos retardados con respecto a la suma de los tiempos de procesamiento de los trabajos. La Ilustración 23 muestra que todos los porcentajes de retardos al incrementar la suma de los tiempos de procesamiento, oscilan alrededor del 10%, el cual corresponde al factor de ajuste establecido que equivale al porcentaje de trabajos retardados que se quiere tener. Por otro lado la Ilustración 24 muestra como a medida que aumentan los tiempos de procesamiento, los retardos sobre el total de retardos se disminuyen exponencialmente sin importar la regla de despacho que se emplee. Estas mismas tendencias se replican para los porcentajes de retardos con un ajuste del 5% y se muestra en la Ilustración 25 y en la Ilustración 26. Este comportamiento es similar para todos los métodos estáticos estudiados.

Ilustración 23. % Retardos del 10%



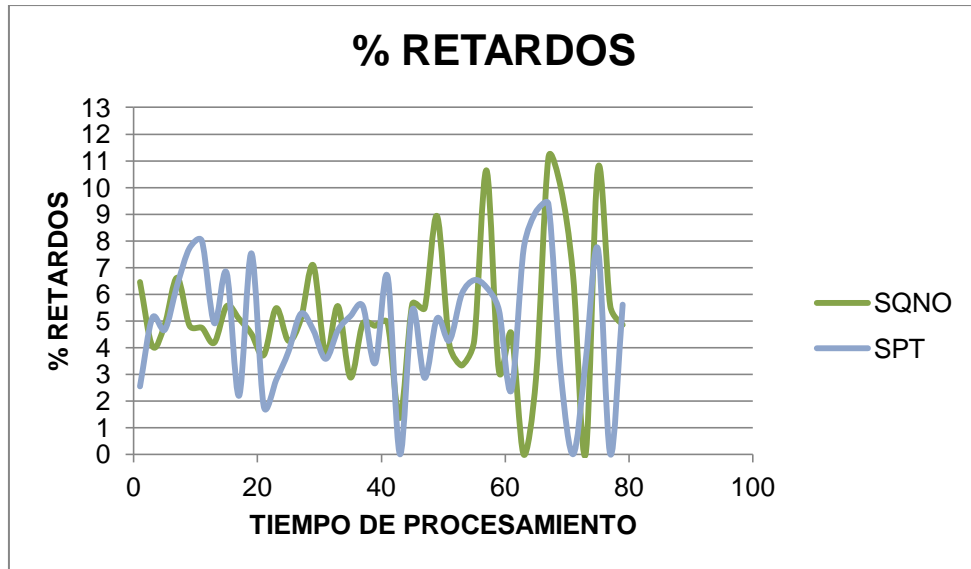
Fuente: elaboración propia

Ilustración 24. Retardos/Total retardados para un 10%



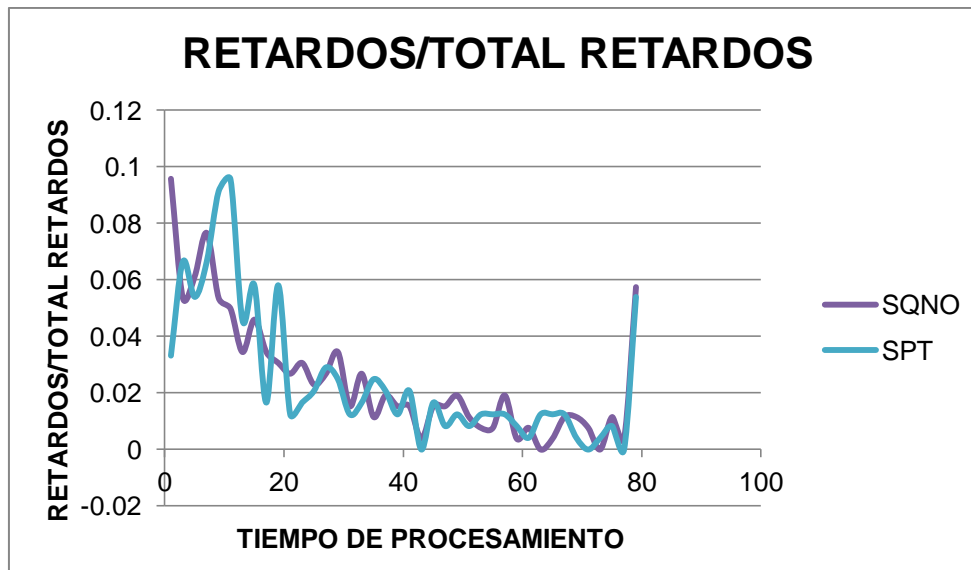
Fuente: elaboración propia

Ilustración 25. % Retardos del 5%



Fuente: elaboración propia

Ilustración 26. Retardos/Total retardados para un 5%



Fuente: elaboración propia

**7.1.2. Fechas de entrega para el método TWK.** Para calcular las fechas de entrega se tomaron los archivos generados por el método de programación finita, teniendo en cuenta los datos relacionados con: la ruta de operaciones de cada trabajo, tiempos de procesamiento para cada máquina, tiempo de inicio del trabajo y el factor de ajuste hallado con el método TWK bajo la regla de despacho SPT (ver Tabla 8). Los resultados de las fechas de entrega obtenidas se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 8. Factor de ajuste**

FACTOR DE AJUSTE	
5%	5.489
10%	4.589
15%	3.979

Fuente: elaboración propia



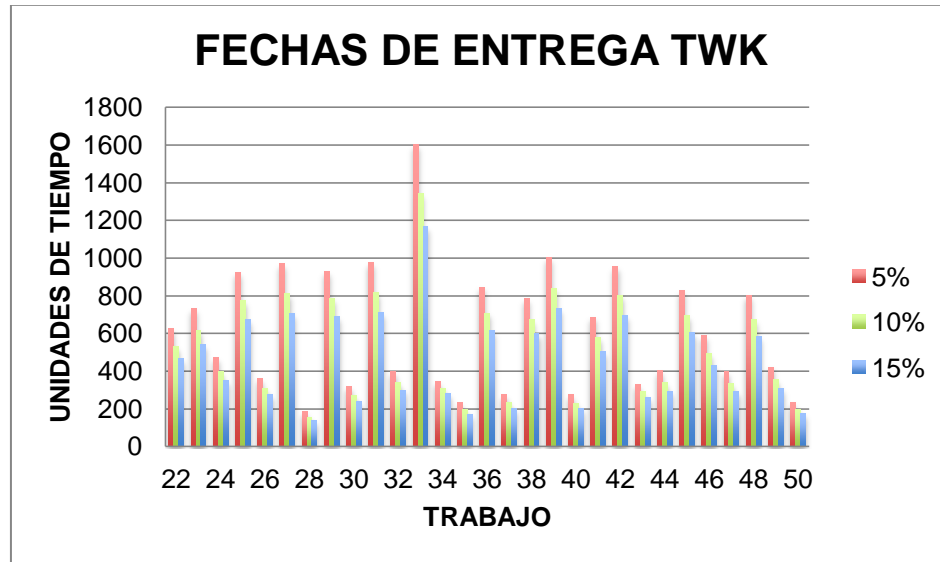
**Tabla 9. Fechas de entrega con el método TWK**

TWK			
JOB	5%	10%	15%
22	626.1844	529.8036	464.4788
23	731.1302	615.8558	537.7255
24	471.5335	397.1406	346.7188
25	922.1569	772.5584	671.1639
26	360.8503	309.2185	274.2236
27	968.6000	810.4588	703.2743
28	184.6448	154.6890	134.3856
29	928.0097	785.1053	688.2478
30	317.8855	268.5399	235.0945
31	975.3151	816.2272	708.4009
32	396.5116	337.9178	298.2041
33	1599.5935	1340.3968	1164.7190
34	342.9716	305.3857	279.9108
35	232.4238	194.7911	169.2845
36	843.8759	707.4424	614.9707
37	274.6940	230.6900	200.8650
38	783.2815	671.8136	596.2632
39	999.8270	838.3520	728.9078
40	273.4555	229.2973	199.3679
41	685.6730	576.2361	502.0622
42	956.0095	800.4009	694.9329
43	330.4953	288.2159	259.5600
44	402.5247	336.7554	292.1784
45	825.9586	694.0187	604.5927
46	585.8158	490.7786	426.3645
47	395.8565	332.7544	289.9853
48	800.5774	671.5792	584.1471
49	420.7838	351.9499	305.2958
50	232.9433	197.1007	172.8074

Fuente: elaboración propia

En la Ilustración 27 se muestra el comportamiento que tienen las fechas de entrega dependiendo del factor que se les asigne.

Ilustración 27. Fechas de entrega TWK

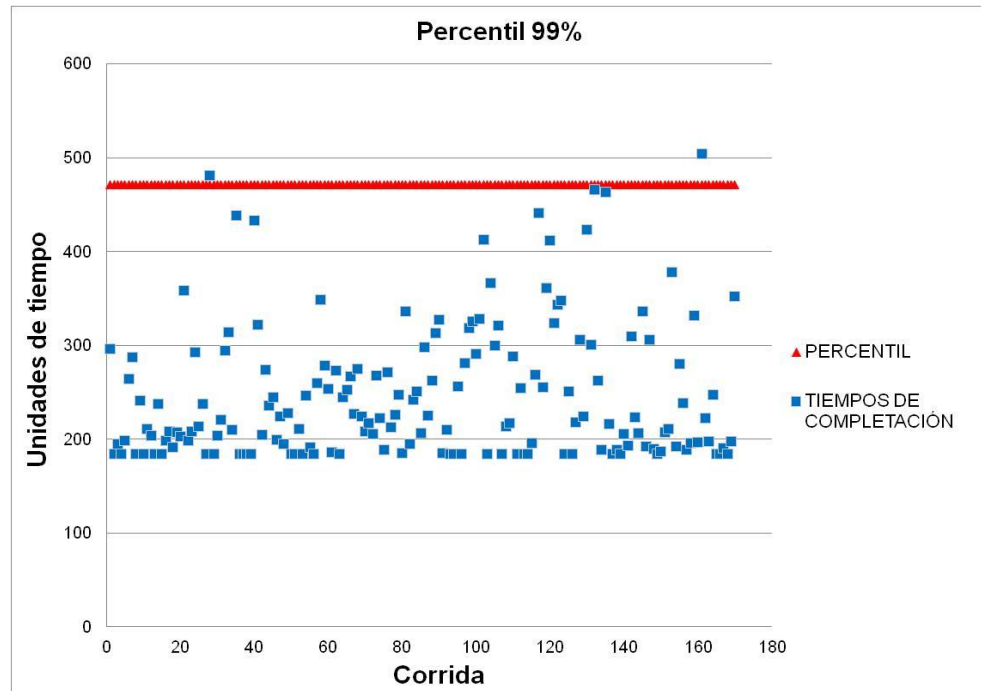


Fuente: elaboración propia

## 7.2. PROGRAMACIÓN FINITA

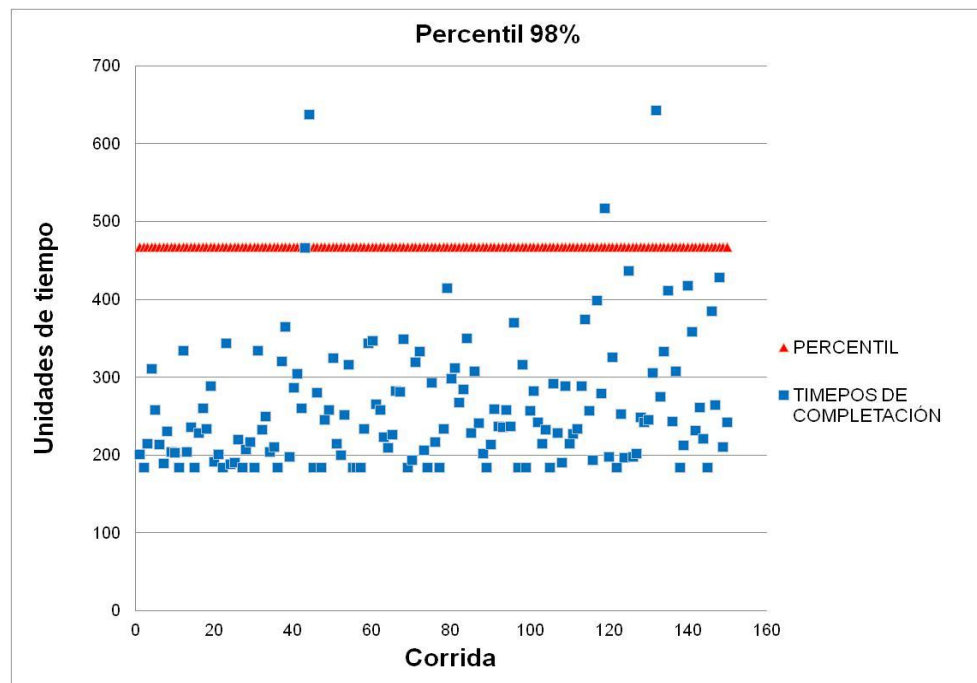
**7.2.1. Calculo de percentiles.** Para evaluar el sistema se utilizó un estado inicial de la planta constante para tres corridas, a las cuales se les establecieron los mismos parámetros, con el fin de validar el funcionamiento del programa y una vez terminadas dichas corridas, se modificó el ajuste para el cálculo del percentil, variándolo entre los siguientes valores: 0.85, 0.90, 0.95, 0.98 y 0.99. En las siguientes gráficas (Ilustración 28, Ilustración 29, Ilustración 30, Ilustración 31 e Ilustración 32) se muestra el comportamiento de los valores de las fechas de entrega generados para el trabajo 22 y el percentil establecido según el ajuste definido.

Ilustración 28. Percentil 99%



Fuente: elaboración propia

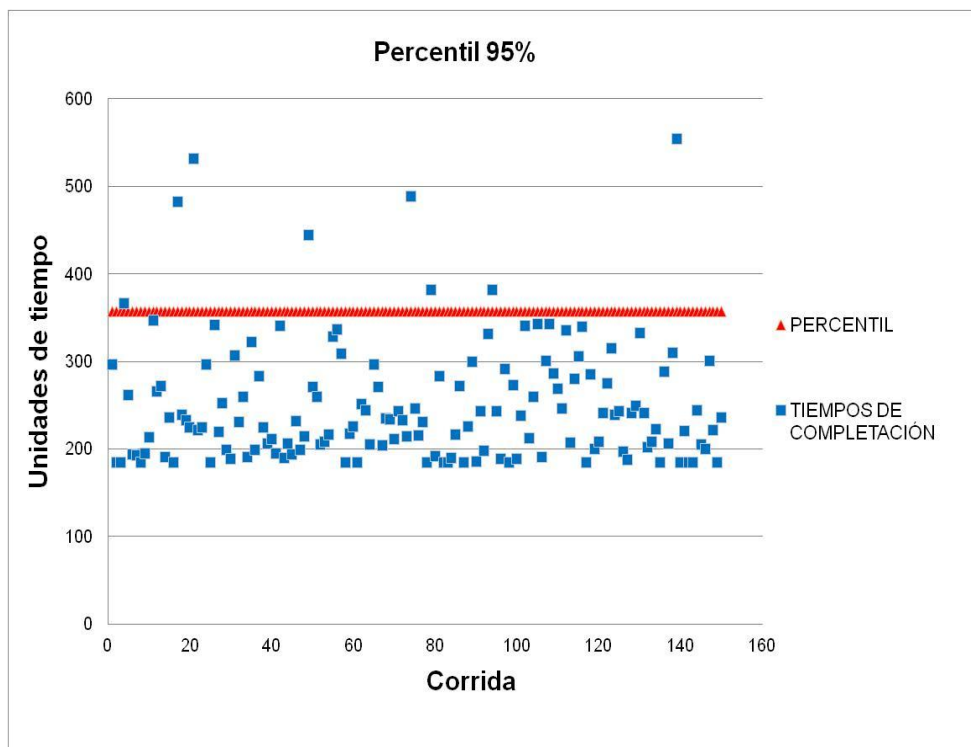
Ilustración 29. Percentil 98%



Fuente: elaboración propia

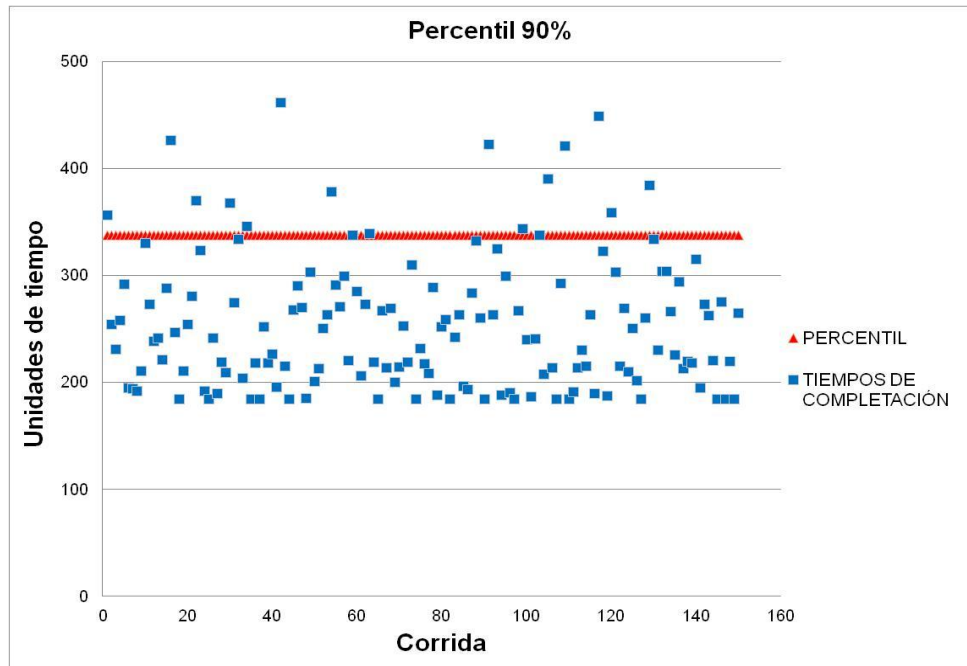
La Ilustración 28 e Ilustración 29 poseen un ajuste alto (99% y 98%), lo cual genera que la fecha de entrega seleccionada (calculada con el percentil) tenga en cuenta ese porcentaje de los datos generados por el programa, lo cual minimiza el riesgo de incumplir la fecha de entrega asignada. Las fechas de entrega establecidas con altos ajustes por lo general son más altas, pues buscan garantizar una mayor confiabilidad.

**Ilustración 30. Percentil 95%**



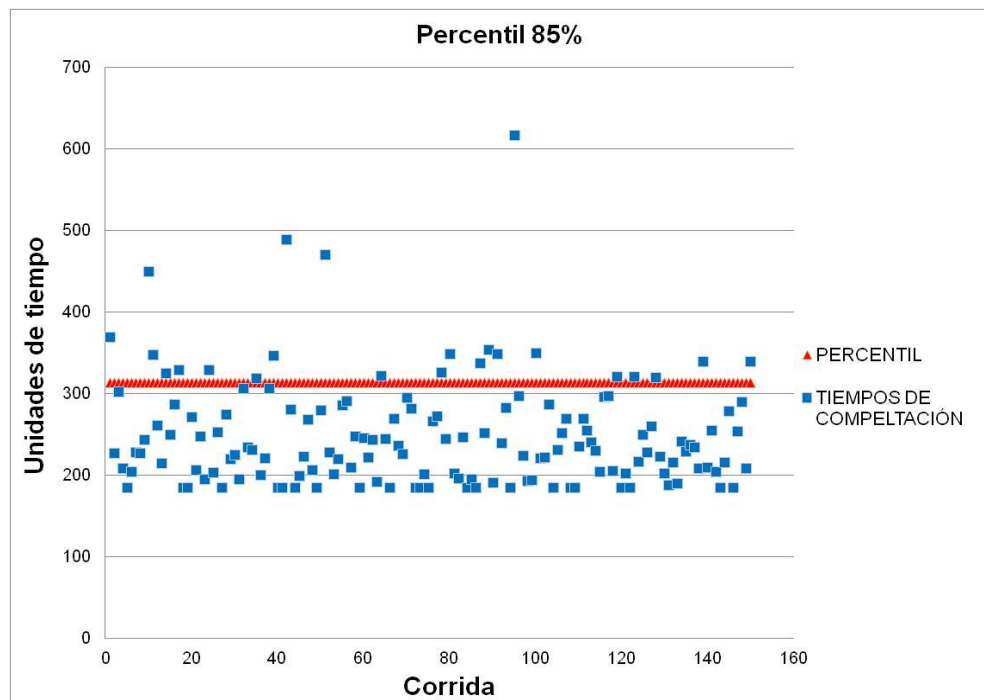
Fuente: elaboración propia

Ilustración 31. Percentil 90%



Fuente: elaboración propia

Ilustración 32. Percentil 85%



Fuente: elaboración propia

En la Ilustración 30, Ilustración 31 e Ilustración 32, se observa como al disminuir el ajuste, se asignan fechas de entrega menos holgadas dejando por encima algunos datos que pueden significar el incumplimiento de estas. No obstante, esta decisión es del usuario y la confiabilidad que quiera tener con las fechas de entrega que define.

**7.2.2. Fechas de entrega.** En la Tabla 10 se muestran las fechas de entrega obtenidas con el método de programación finita para diferentes ajustes. En esta tabla se puede observar que a medida que se aumenta el ajuste del programa, la fecha de entrega también aumenta, esto debido a que se busca asegurar en mayor medida el cumplimiento de dicha fecha, por esta razón entre menor sea el ajuste se corre un mayor riesgo de incumplirle al cliente la fecha de entrega establecida. Cuando se refiere a fechas de entrega ajustadas, se pretende mostrar que de acuerdo al valor del ajuste, las fechas pueden tener un valor mayor o menor.

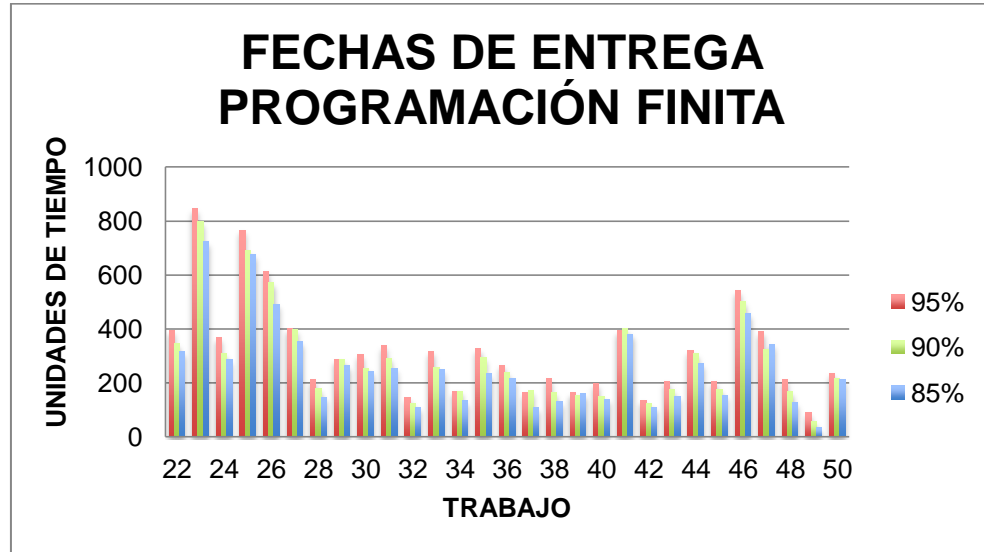
**Tabla 10. Variación de las fechas de entrega de acuerdo al ajuste**

PROGRAMACIÓN FINITA			
JOB	95%	90%	85%
22	396.4572	345.7430	315.8324
23	845.6928	798.5806	724.3475
24	368.8523	309.0635	285.9083
25	766.6442	692.0315	677.1132
26	614.6143	572.0466	492.9429
27	401.5026	399.5209	353.8152
28	213.0310	180.6039	147.7089
29	287.1793	286.2821	264.8063
30	305.0652	255.2886	244.4766
31	339.5078	292.4807	253.9929
32	144.3348	123.6873	110.0428
33	317.1057	257.3498	249.6063
34	169.0099	170.1419	133.2159
35	327.5237	294.6261	234.5283
36	266.5277	237.4960	215.7577
37	163.9017	171.8142	108.1989
38	217.8160	164.3989	132.8492
39	163.6126	155.3013	161.0368
40	197.4561	149.8590	140.4926
41	394.6487	402.0552	381.4135
42	135.6383	122.2970	109.8041
43	206.9857	174.5031	150.2582
44	320.8233	309.3948	272.4892
45	206.5971	177.6958	155.0718
46	543.0024	502.1153	458.8462
47	392.0044	324.2681	343.2337
48	212.3999	167.3699	128.0983
49	90.7564	58.0353	34.8943
50	236.3467	217.0386	211.4583

Fuente: elaboración propia

En la Ilustración 33 se muestra el comportamiento de las fechas de entrega según el ajuste seleccionado.

Ilustración 33. Fechas de entrega con programación finita

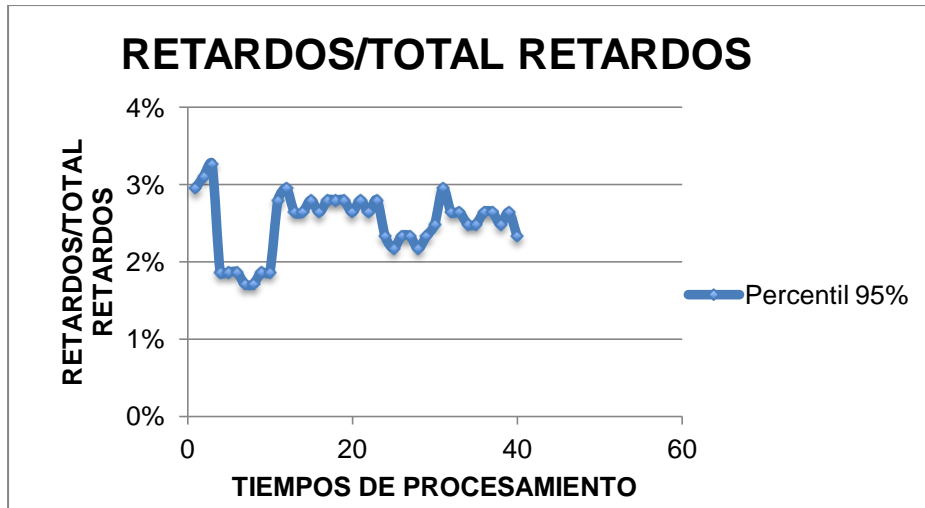


Fuente: elaboración propia

La Ilustración 34, fue obtenida a partir de los retardos obtenidos en un rango sobre el total de retardos, con el fin de obtener una gráfica comparable con las de los métodos estáticos. En donde un rango es la ejecución del programa para los 29 trabajos con 150 corridas cada uno.



Ilustración 34. Retardos/Total retardados para el percentil de 95%



Fuente: elaboración propia

**7.2.3. Comparativo fechas de entrega.** En la Tabla 11. Comparación fechas de entrega se muestran las fechas de entrega asignados por los métodos TWK y programación finita y el tiempo de completación para cada trabajo, a partir de la simulación.

Tabla 11. Comparación fechas de entrega

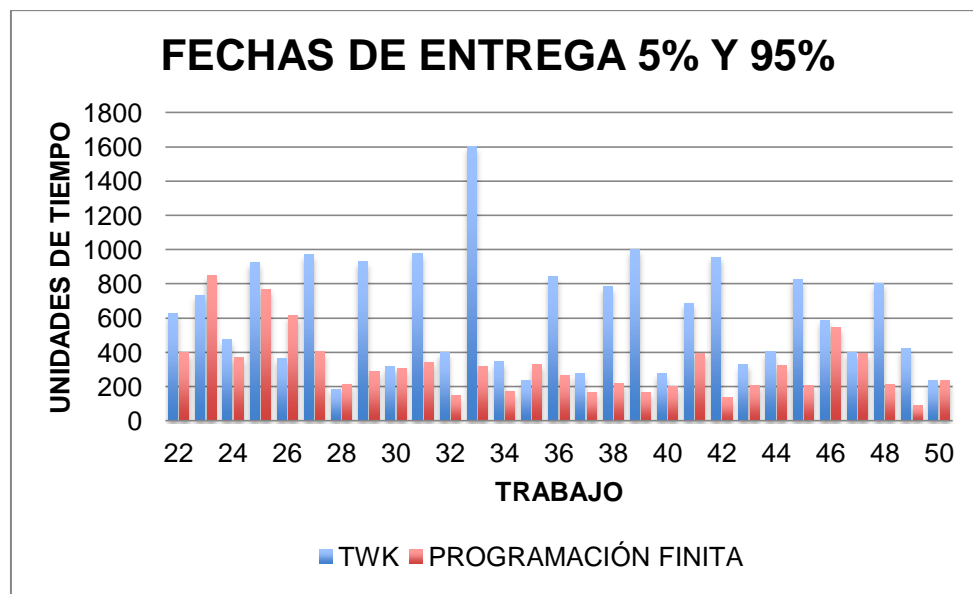
TRABAJO	FECHAS DE ENTREGA		TIEMPO DE COMPLETACIÓN
	TWK 5%	PROGRAMACIÓN FINITA 95%	
22	499.715013	396.457244	249.7365413
23	669.546528	845.6928147	404.5530646
24	670.860152	368.8523369	198.5992374
25	434.94806	766.6441963	438.6951765
26	312.214691	614.6142547	344.7498211
27	626.18442	401.5025578	419.1786216
28	731.130151	213.0309678	143.1546119
29	471.533534	287.1792576	489.0154788
30	922.156876	305.0652401	395.5593914
31	360.850301	339.5077918	486.9296128
32	968.600003	144.3347661	293.562537
33	184.644811	317.1056894	366.9542614
34	928.009748	169.0099284	311.4231876

35	317.885463	327.5236702	416.6807903
36	975.315148	266.5276567	407.2561959
37	396.511621	163.9016582	448.7050305
38	1599.59352	217.8159506	270.4764614
39	342.9716	163.6126355	465.9737058
40	232.423818	197.4560855	327.5458576
42	274.694022	135.6383392	225.7303168
43	783.281541	206.9857236	305.8817948
45	273.455546	206.5971224	303.3830874
48	330.495259	212.3998763	139.9005106

Fuente: elaboración propia

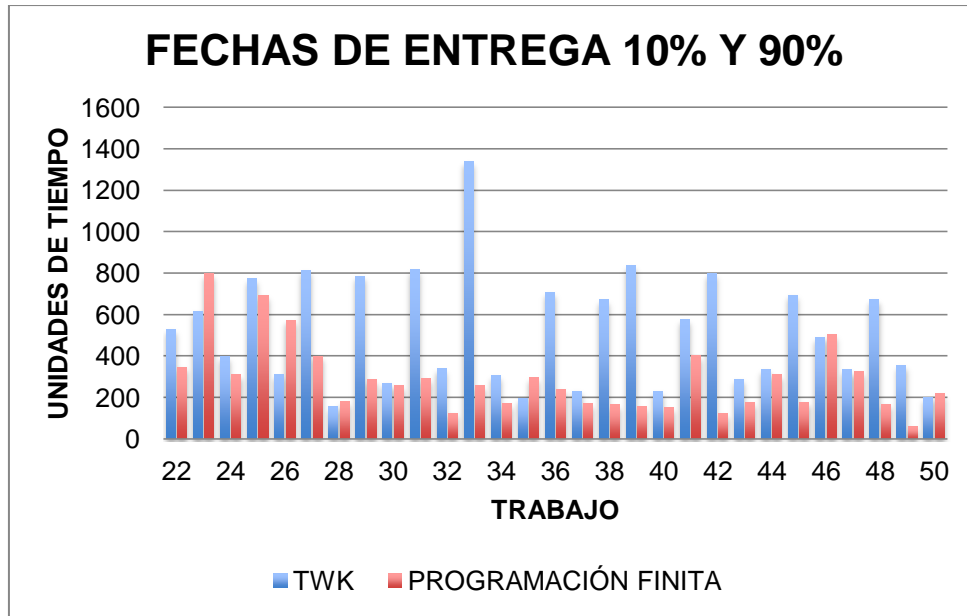
A partir de la Tabla 11 se construye la Ilustración 35, para poder comparar visualmente los valores de las fechas de entrega asignados a los trabajos por los métodos TWK (barras azules) y programación finita (barras rojas). La Ilustración 36 e Ilustración 37, se construyen de la misma forma.

**Ilustración 35. Fechas de entrega para un factor de 5% y ajuste de 95%**



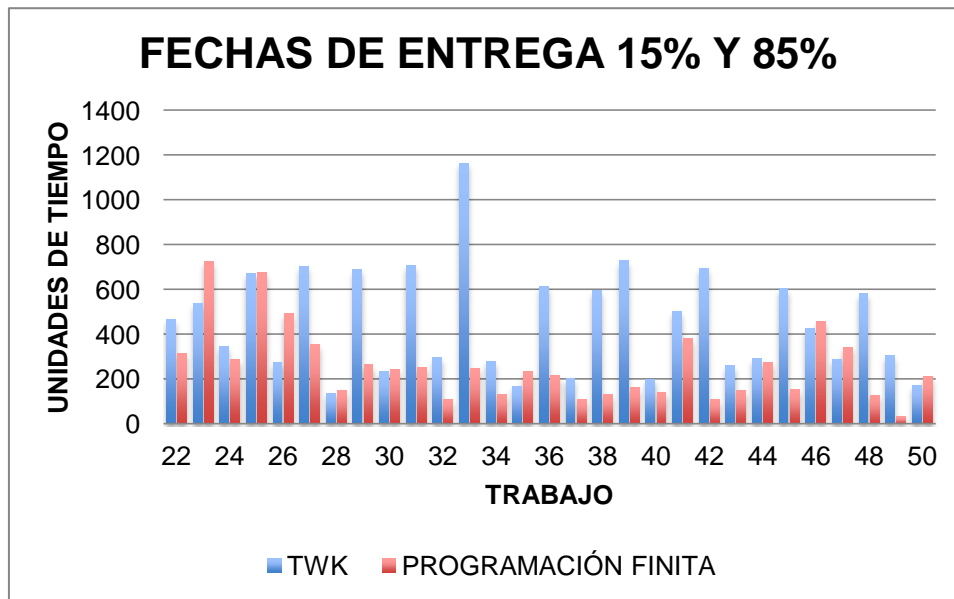
Fuente: elaboración propia

Ilustración 36. Fechas de entrega para un factor de 10% y ajuste de 90%



Fuente: elaboración propia

Ilustración 37. Fechas de entrega para un factor de 15% y ajuste de 85%



Fuente: elaboración propia

## 1. CONCLUSIONES

- Después de analizar la literatura relacionada con el conflicto entre las áreas de ventas y producción, se puede establecer que es un conflicto que se presenta desde hace más de treinta años y que aún no se le ha encontrado solución, por lo cual ha sido objeto de estudio de diferentes autores para establecer sus causas y proponer soluciones que lo mitiguen o lo disminuyan, ya que la complejidad y naturaleza del conflicto hace poco posible su eliminación.
- A partir de la revisión del estado del arte, se decidió trabajar en el mejoramiento de la comunicación inter-funcional, al relacionar la información del pedido del cliente, con la carga actual de la planta para poder establecer fechas de entrega, de tal forma que se pueda satisfacer las necesidades del cliente sin dejar de lado las implicaciones y el impacto que puede tener el área de producción.
- La información necesaria para aplicar el software desarrollado en una empresa (Job shop) será: Distribución de operaciones, máquinas y tiempos de procesamiento para los productos (Ver Tabla 4) y Registro de operaciones (Ver Tabla 7) del Job Shop, los cuales servirán para la elaboración del diagrama de Gantt y la ruta de operaciones del trabajo.
- Se puede concluir que el modelo de programación finita desarrollado cumple la función de calcular fechas de entrega factibles y ajustadas, ya que los resultados arrojados muestran que el porcentaje de retardos están alrededor del 2% y 3% (ver Ilustración 34), lo cual significa que las fechas de entrega propuestas se pueden cumplir; y pueden ser ajustadas, a partir del parámetro de ajuste del percentil (ver Tabla 10).

- El método de programación finita, a diferencia de los métodos estáticos, utiliza dentro de sus datos de entrada información relacionada con la carga actual de la planta, lo cual le permite tener información actualizada y coherente con lo que realmente está pasando en la empresa y así establecer compromisos con el cliente más acertados; generando mayores beneficios, tanto para el cliente como para las áreas involucradas con la venta y producción de su pedido.
- Al analizar la Ilustración 35, la Ilustración 36 y la Ilustración 37, donde se compara las fechas de entrega asignadas por cada método, se puede establecer, que el método de programación finita, permite asignar fechas de entrega más ajustadas, sin perder su factibilidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- Azarang, M. R., & García Dunna, E. (1996). *Simulación y análisis de modelos estocásticos*. México: Mc Graw Hill.
- Baker, K. R. (1984). Sequencing rules and due-date assignments in a job shop. *Management Science* 30 , 349-360.
- Baker, K. R., & Bertrand J, W. M. (1981). A comparison of due date selection rules. *AIIE Transactions* 13 , 123-131.
- Baker, K. R., & Kanet, J. J. (1983). Job shop scheduling with modified due dates. *Journal of operations Management* 4 , 11-22.
- Bertrand J., M. W. (1981). The control of job lateness in control release and in non-controlled release production systems. *Eindhoven University of thecnology research report* .
- Chang, F. R. (1997). A study of factors affecting due-date predictability in a simulated dynamic job shop. *Journal of Manufacturing Systems* 13 , 393-400.
- Crittenden, V. L., Gardiner, L. R., & Stam, A. (1993). Reducing conflict between Marketing and Manufacturing. *Industrial Marketing Management* 22 , 229-309.
- Eilon, S., & Chowdhury, I. G. (1976). Due dates in job shop scheduling. *International Journal of production research* , 223-237.
- Eilon, S., Chowdhury, I., & Serghiou, S. (1975). Experiments with de SI\* rule in job shops scheduling. *Sumulation* 24 , 45-48.
- Elvers, D. A. (1973). Job shop dispatching using various due date setting criteria. *Production and industrial management* , 62-69.
- Enns, S. T. (1995). A dynamic forecasting model for job shop flowtime prediction and tardiness control. *International Journal of Production Research* , 1295-1312.
- Greffen, A., & Hauser, J. R. (1996). Integrating R&D and Marketing: Review and Analysis of Literature. *Journal of Products Innovation Management* , 191-215.
- Guenzi, P., & Troilo, G. (2006). Developing marketing capabilities for customer value creation through Marketing-Sales integration. *Industrial Marketing Management* 35 , 974-988.
- Gupta, A. K., Raj, S. P., & Wilemon, D. (1985). The R&D Marketing Interface in High-Technology Firms. *Journal pf Product Innovation Management*, 2 , 12-24.

- Jones, C. H. (1973). An economic evaluation of job shop despatching rules . *Management and science* , 293-307.
- Kim, C., Lee, M., & Park, T. (2010). The effects of collaboration between marketing and production in internal and external performance. *California Journal of Operations Management, Volumen 8, Número 1* , 11-20.
- Konijnendijk, P. A. (1993). Dependence and conflict between production and sales. *Industrial marketing management* , 161-167.
- Mazziotti, B. W., & Horne, R. E. (1997). Creating a flexible, simulation-based finite scheduling tool. *Winter simulation Conference* , 853-860.
- O'Leary-Kelly, S. W., & Flores, B. E. (2002). The integration of manufacturing and marketing/sales decisions: impact on organizational performance. *Journal of operations Management 20* , 221-240.
- Perera, T., & Liyanage, K. (1999). Methodology for rapid identification and collection of input data in the simulation of manufacturing systems. *Modelling and Simulation Research group* , 645-656.
- Philipoom, P., Rees, R., & Wiegman, L. (1994). Using neural networks to determine internally-set-due-date assignments for shop scheduling. *Decision Sciences 25* , 825-851.
- Pinedo, M., & Chao, X. (1999). *Operations scheduling with applications in manufacturing and services*. Mc Graw Hill.
- Powers, T. L., Sterling, J. U., & Wolter, J. F. (1988). Marketing and Manufacturing Conflict Sources and Resolution. *Production and Inventory Management Journal 1* , 56-60.
- Pritsker, A. (1995). *Introduction to simulation and SLAM II (Edicion 4)*. New York : Wiley.
- Ragatz, G., & Mabert, V. A. (1984). A simulation analysis of due date assignmnet rules. *Journal of operations Management 5* , 27-39.
- Ramasesh, R. (1990). Dynamic job shop scheduling: a survey of simulation research. *Omega 18* , 43-57.
- Shapiro, B. P. (1977). Can Marketing and Manufacturing Coexist? *Harvard Business Review* , 104.114.
- Shaw, B., & Shaw, C. T. (1998). Conflict between Engineers and Marketers: The Engineer's Perspective. *Industrial Marketing Managementn27* , 279-291.

Smith, M. L., & Seidman, A. (1983). Due date selection procedures for Job-Shop simulation. *Computers and industrial engineering* 7 , 199-207.

Souder, W. E. (1981). Disharmony between R&D and Marketing. *Industrial Marketing Management* 10 , 63-73.

Tütek, H., & Ay, C. (s.f.). Resolving conflict between marketing and engineering: a quest for effective integration. *Faculty of Economics and Business Administrations* , 535-546.

Uglen, O. M. (1975). *Effects of job file and study parameters on the performance of a job shop*. Texas: Texas Tech University.

Veral, E. A. (2001). Computer simulation of due-date setting in multi-machine job shops. *Computer & insutrial Engineering* 41 , 77-94.

Vig, M. M., & Dooley, K. J. (1993). Mixing static and dynamic flowtime estimates for due-date assignment. *Journal of Operations Management* , 67-79.