BIBLIOTECA
INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS
ESTADO
DE
MEXICO

222-15

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

CAMPUS ESTADO DE MEXICO

BIBLIOTECA
INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS
ESTADO
DE
MEXICO

SIMULACIÓN EN LA MANUFACTURA:

Una Aplicación en el Moldeo de Piezas Plásticas por Inyección

TESIS QUE PRESENTA:

MIGUEL ANGEL TOLEDO CUEVAS

MAESTRIA EN SISTEMAS DE MANUFACTURA

MSMA93

Asesor:	**Dr. PEDRO GRASA SOLER**	
Comité de Tesis:	**Dr. JUAN CORONA**	
	M. en C. MARCO MONTUFAR	
Jurado:	**Dr. Juan Corona**	**Presidente**
	M. en C. Marco Montufar	**Secretario**
	Dr. Pedro Grasa Soler	**Vocal**

Atizapán de Zaragoza, Estado de México, Mayo de 1998.

TESIS
TS
1892
.T6
1998

06 JUN 2000

88430

RECONOCIMIENTOS

Al **CONACyT,** reconociendo su labor en el apoyo para la formación de profesionales especializados que tanto requiere nuestro país. Agradezco al Consejo las facilidades para el termino de mis estudios y la realización del presente trabajo

Al **ITESM CEM,** por su disposición de los recursos humanos y técnicos; así como de las instalaciones apropiadas. Doy mérito a la Institución por ser la guía para la consolidación de este nuevo proyecto en mi desarrollo profesional.

A mis Profesores que compartieron no solo sus conocimientos, también me enseñaron el valor de luchar por la superación personal y del país.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente ayudaron a la creación de esta tesis y que comparten su realización.

Miguel Angel

RESUMEN

Basado en el modelado por Algoritmos de Eventos el trabajo de investigación presentado, el trabajo estudia la problemática del inventario en el área de producción para el proceso de máquinas de inyección en modo semimanual. La máquinas operan paralelamente y su producto es transportado a almacén por un recuso de carga compartido.

La producción de piezas plásticas por inyección es un proceso en el cual están involucradas variables cuyo comportamiento es, en cierto rango, imprevisible. Aunado a la variación del proceso semimanual , el problema de la predicción del material acumulado en un momento dado es objeto de estudio y análisis.

El algoritmo propuesto rescata las características fundamentales del proceso, estocástico por naturaleza, y simula el comportamiento. Aprovecha la versatilidad del algoritmo para cambiar las condiciones y proyectar el comportamiento del sistema con modificaciones para su mejora, posibles soluciones. El fin de la simulación es poder dar una propuesta de solución como apoyo para la toma de decisiones.

CONTENIDO

Tema	Página
RECONOCIMIENTOS	2
RESUMEN	3
INDICE	4
PARTE 1:	
1. Introducción	9
1.1. Objetivos	9
1.2. Antecedentes	11
1.3. Hipótesis del Trabajo	13
PARTE 2:	
2. Simulación de Sistemas Estocásticos	17
2.1. Parámetros de Medición de los Sistemas de Manufactura	17
2.2. Procesos de Líneas de Espera	23
2.3. Modelado por Algoritmo de Simulación	29
3. Modelado del Sistema	37
3.1. Algoritmo de Simulación para Líneas de Espera en Paralelo	38
PARTE 3:	
4. La industria de Inyección de Plásticos	47
4.1. Empresa "Plásticos Duros"	47
4.1.1. Proceso de Inyección de Plásticos	53
4.1.2. Parámetros del Sistema	58
5. Estudio del Sistema	62
5.1. Manejo de Datos y Consideraciones	62
5.2. Aplicación del Algoritmo de Simulación	68

Continuación

	Tema	Página
6.	Análisis de Resultados	71
	6.1. Comparación de Resultados	74
7.	Conclusiones	78
	7.1. Conclusiones y Recomendaciones	78
	7.2. Discusión del Sistema	82
	7.3. Bibliografía	83
APENDICE		
	A Programa de Simulación.	85
	B Gráficos de Simulación	93

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Esquema de Línea de Espera	23
2.2 Flujo de Control de la Aproximación por Evento Siguiente .	31
3.1 Máquina I del Area de Producción D	37
3.2 Diagrama de Máquina I con fallas y arribo en paquete . .	38
4.1 Plano de Piso de la Nave D	49
4.2 Diagrama esquemático de la Nave D	51
4.3 Análisis de Bitácora a Pie de Máquina	52
4.4 Máquina de Inyección de Tornillo Reciprocante . . .	56
4.5 Ciclo de Inyección de Plástico del Procesado de Termopláticos .	56
4.6 Porcentaje del tiempo de ciclo por las actividades involucradas .	57
4.7 Variables que intervienen en el Tiempo de Ciclo. . .	58
5.1 Hoja de Recolección de Datos	63
5.2 Tiempos de Inyección Nave D	66
5.3 Distribución de Producción para Máquina I, Sistema Real .	66
5.4 Distribución de Producción para Máquina I, Simulación .	67
5.5 Proceso de Producción de Piezas Plásticas . . .	69
5.6 Representación del área de trabajo para un operador . .	70
6.1 Distribuciones de 30 replicas para: producción y recolecta .	73
6.2 Porcentaje de Utilización del Montacargas con Política . .	75

INDICE DE TABLAS

Tabla **Página**

4.1 Principales resinas para la fabricación de plásticos . . 55

5.1 Parámetros de Máquinas Area D, Sistema Real . . . 65

5.2 Parámetros de Máquinas Area D Simulación . . . 67

6.1 Parámetros de Variables de Entrada 71

6.2 Parámetros de Variables de Entrada con diferente media. . 73

6.3 Comparación del Algoritmo de Simulación para valores medios de recolección 74

PARTE 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

La base primera para la realización del presente trabajo es precisamente el hecho de considerar a la simulación como una herramienta de apoyo para entender el comportamiento de sistemas reales. Así como exponer restricciones en la representación abstracta por un modelo determinado. Preguntas como ¿como puede ayudar la simulación a la industria?, o bien, ¿dónde un modelo desarrollado puede aplicar en los sistemas productivos?; son, en general, los puntos fundamentales que dan sentido y soporte para la construcción del algoritmo que se presenta. La aplicación del algoritmo desarrollado en la manufactura, justifica y orienta la investigación realizada para llegar a comprender el origen y los alcances de la herramienta manejada.

El propósito del modelado es deducir reglas acerca del desempeño de un sistema real o conceptual [5].

Uno de los problemas inherentes de la industria de la transformación es el inventario. El costo de activos tanto en bodega como en planta, ya sea materia prima o producto terminado, es un factor determinante en la rentabilidad de la empresa. Cuando el inventario no es correctamente planeado y controlado redunda en gastos de espacio, mantenimiento y renta del local, así como dificultad de movimientos debidos al material acumulado. Así el trabajo presente tiene por objetivo:

Objetivo General

1. A partir de un problema de la industria (moldeo de piezas por inyección de plástico) se genera un algoritmo de simulación que describe al sistema. El modelo se verifica con el sistema real y se propone posibles soluciones al problema de material acumulado respecto a la recolección de cajas.

Objetivos Específicos

1. Considerar los algoritmos de simulación como una solución al problemas en sistemas que tengan algún grado de incertidumbre en su desempeño.
2. Establecer bases en la aplicación de un modelo estocástico al problema de material acumulado en el sistema de inyección de plástico.
3. Obtener la medidas de desempeño para Líneas de Espera en el sistema
4. Proponer tiempos de recolección u otro medio adecuado para el problema planteado, favorable en la toma de decisiones.

1.2 ANTECEDENTES

México en el año de 1994 ocupaba la posición 48 del reporte de competitividad internacional elaborado por el Foro Económico Mundial [INEGI]; lo cual muestra una realidad de carestía en aspectos como Financiamiento (lugar 46), Ciencia y Tecnología (lugar 45) entre otras. Desde finales del mismo año, México a vivido una situación de crisis. Al modificarse la relación con el exterior, el país ha tenido que enfrentar un sinnúmero de obstáculos para mantenerse a flote. La industria mexicana que ha sobrevivido a la crisis ha implementado innovaciones tecnológicas en sus procesos industriales y administrativos buscando la eficiencia y oportunidades de salir adelante. Técnicas y estrategias disponibles tales como la automatización, la reingeniería y la administración con recursos informáticos son herramientas disponibles que apoyan a la industria en su mejora.

Con la necesidad de mantenerse en el mercado, la industria mexicana requiere de herramientas que le ayuden al diseño y toma de decisiones de proyectos de desarrollo a corto y mediano plazo. Dado que ahora sus productos compiten en forma abierta con empresas extranjeras, muchas de las cuales cuentan con mejor organización y tecnología; un primer paso para lograr el avance técnico es aplicar las alternativas que la tecnología de vanguardia puede ofrecer a la industria. Los sistemas de manufactura, en especial los que involucran operaciones manuales involucran ciertas variables de operación que cambian azarosamente en un tiempo definido. Considerados sistemas dinámicos o sistemas estocásticos con variables de distribución de probabilidad la mayoría de los sistemas de producción varias sus tiempos de proceso de manera incierta en cierto rango de operación. Los modelos estocásticos ofrecen una herramienta de análisis de sistemas dinámicos y solución a cuestiones del comportamiento de las variables aleatorias que comprenden.

Existen varios tipos de modelos pero su eficiencia y utilidad dependen en gran medida de la aplicación y sus cualidades. Se mostrará que, como área de aplicación, los modelos probabilísticos y la simulación son aplicables a la manufactura. La cual es en esencia un proceso de transformación por el cual la materia prima, trabajo, energía y equipo son combinados para producir bienes de calidad. Esta transformación involucra muchas variables que afectan al proceso de manera aleatoria; que dan la pauta para buscar una forma de entender su proceder a través de la simulación. Un modelo por Algoritmo de Simulación se desarrolla reproduciendo las características esenciales del sistema original y da información de su funcionamiento. El fin último del modelo de simulación es dado por el usuario en su consideración para la toma de decisiones al respecto del problema de inventario en planta.

1.3 HIPOTESIS DEL TRABAJO

Los sistemas discretos que pueden modelarse en forma se pueden encontrar en diversas áreas como la manufactura, transporte, computación, comunicaciones, finanzas, etc. Además en diseños que utilizan métodos de simulación para diseñar y probar nuevos sistemas evaluándolos con los existentes, eliminando así el riesgo costoso de prototipos físicos y estudios pilotos. Los sistemas considerados son reales o propuestos, incluso teóricos.

En el proceso de producción de plásticos por inyección de resina termoplástica, el número de variables que se involucran y el modo de operación de las máquinas, dificultan la predicción del comportamiento del sistema como: el inventario, el manejo optimo de los materiales; así como en la planeación de actividades dependientes de dichas variables. Para el proceso descrito en este trabajo, la incertidumbre en la variación de las operaciones de producción obliga a tomar algunas medidas para asegurar la existencia de materia prima durante todo el ciclo de producción, tanto como evitar la acumulación de producto terminado y material de empaque en el área de trabajo. En el proceso de inyección del área de trabajo bajo estudio, dos de las soluciones implementadas a estos problemas son: mandar la mayor parte de la materia prima requerida planeada al área de producción, dedicar mayor tiempo y personal en la recolección de producto terminado. Ambas soluciones en circunstancias criticas pueden detener la producción por falta de espacio para seguir produciendo o hacer casi imposible el movimiento y circulación del material en el área.

El sistema de producción de piezas plásticas por inyección es complejo y depende de muchas variables que influyen en mayor o menor medida en el desempeño del mismo. Así, un buen paso para entender, predecir y controlar su funcionamiento es realizando un modelo con las características principales del sistema y que más influyen en él. Con base en el proceso de inyección de plástico como sistema dinámico con variables estocásticas se realiza el estudio de la factibilidad de utilizar un algoritmo de simulación y generar un modelo convincente y adecuado que pueda describir al sistema de acuerdo con características tales como:

1. Flexibilidad del modelo
2. Facilidad de mejoras al algoritmo
3. Confiabilidad del modelo
4. Sencillez en su análisis y realización
5. Rapidez de desarrollo y operación
6. Comprensión del modelo y de los resultados
7. Tamaño de máximo de modelo

Estas características generales se aplican a los diferentes lenguajes de simulación y en especial para el algoritmo propuesto para el análisis del sistema. Tomando en cuenta la naturaleza del proceso como sistema dinámico, un algoritmo por eventos se basa en sucesos que afectan a uno o más elementos del sistema. Un algoritmo sencillo que cubre estas cualidades es el propuesto:

Algoritmo de Simulación por Eventos.- La parte medular de esta clase de algoritmos es la descomposición del sistema en eventos discretos que acaecen cambiando el estado del sistema, para dar origen a las "rutas muestra" o historial de eventos dependiendo del estado actual y las condiciones para la ocurrencia de un siguiente evento. Una vez creado el algoritmo con todos los sucesos que acontecen, cada suceso puede tener su propia distribución y secuencia a partir de las variables aleatorias creadas. Existen infinidad de rutas muestra que el proceso produce y el comportamiento de la simulación es similar al sistema real. El tamaño del modelo está restringido a la capacidad de la máquina en que se procese. Además, el algoritmo es flexible para aceptar eventos adicionales y ser actualizado según los nuevos requerimientos.

El trabajo desarrollado tiene como base el problema de exceso de material en el área de producción. A partir del cual, y con algunas consideraciones, se genera un modelo de simulación que da solución al problema y puede extenderse a problemas similares.

Justificación

El modelado de sistemas de manufactura provee herramientas para representar, pronosticar y describir los sistemas de producción. Puede comprender programas de algoritmos desarrollados en específico o bien paquetes comerciales, y su finalidad es representar, lo más fielmente posible, al sistema físico. Estas herramientas ofrecen grandes ventajas en la dirección y supervisión de la manufactura; y su correcta aplicación puede ayudar enormemente a las industria. Los modelos en general se pueden aplicar casi a cualquier actividad que involucre sistemas individuales operando simultáneamente, relacionados entre sí.

Al modelar los sistemas podemos: visualizar de manera sencilla su comportamiento, identificar los parámetros principales y decidir sobre ellos; describir las características principales y mostrar el comportamiento del sistema actual. Obtener histogramas, limitaciones y alternativas, son también función de los modelos. Así mismo, tenemos la capacidad de alterar las circunstancias actuales para observar como se comportaría el sistema bajo ciertas condiciones. Una visión de lo que podría suceder a futuro considerando tendencias actuales, o de las posibilidades de fallo del sistema, son ventajas que también podemos obtener al modelar. Todas estas ventajas tienen como objetivo visualizar la realidad y tomar decisiones sin que afecte al sistema físico.

Los errores en las empresas son caros y, en proporción inversa con el tamaño de la empresa, repercuten negativamente en la posibilidad de absorberlo. Las pequeñas y medianas empresas no pueden permitirse el lujo de reprocesar la mayor parte de su producción o de comprar otro equipo porque el primero no cubría sus necesidades. En general un gasto de esta naturaleza perjudica en gran medida la solvencia de la empresa y la puede llevar a la quiebra. De aquí surge la necesidad de determinar y prever el efecto que los ajustes o los cambios en las condiciones de producción provocarán, sin el riesgo de llevarlos a la práctica. En este aspecto, los modelos proveen una mejor opción en comparación con los métodos estadísticos y los empíricos. Adelantarse a los hechos, dando la capacidad de visualizar y planear a futuro influyendo en la toma de decisiones; tanto en la parte administrativa como operativa de la empresa es una cualidad de los modelos de simulación.

PARTE 2

2 SIMULACIÓN DE SISTEMAS ESTOCASTICOS

2.1 PARAMETROS DE MEDICION DE LOS SISTEMAS DE MANUFACTURA

2.1.1 Medidas de Desempeño

Un fin de toda industria manufacturera es transformar la materia prima que adquiere de proveedores en bienes de consumo o productos necesarios para la sociedad, añadiendo un valor agregado. Otro fin, primordial para los inversionistas, es obtener ganancias del producto generado que les reditúen el capital invertido. La mayoría de las empresas cumplen esta misión pobremente. Las causas posibles son falta de competitividad en los productos y efectividad en sus procedimientos. Los productos en inventario, en cualquier punto del proceso, son en esencia dinero parado que aumenta el costo de la producción. Respecto a la competitividad de los productos, estos deben de cumplir al menos una de las siguientes características: bajo costo, alta calidad, buen servicio e innovación. La reducción de costos y mejora en el manejo de tiempos pueden lograrse eliminando todas las actividades que no dan valor agregado al producto [3].

En todo sistema de manufactura se pueden distinguir medidas de su desempeño que son indicadores del nivel de competitividad del sistema en el mundo de la manufactura; y que son la base de medición entre industrias. Estas son:

1. Tiempo de Paso de Manufactura

Básicamente el tiempo de paso es el tiempo en que tarda la materia prima en trasformarse en producto terminado en su paso por el proceso se producción. Idealmente se maneja la

eliminación de operaciones inútiles que no dan valor agregado al producto. Dos definiciones al respecto describen mejor el punto.

- El Tiempo de Paso de Manufactura (TCM) de un producto es el tiempo total requerido para procesar el producto a través de la planta de manufactura.
- El Tiempo de Paso Total (TCT) de un producto es el lapso de tiempo total desde el instante que materia prima es ordenada hasta el momento en que el producto terminado es liberado.

El TCM ideal es el tiempo real de manufactura; es decir, implica tener cero inventarios, cero manejo de material, cero tiempo de puesta, cero defectos, ninguna descompostura y un tamaño de lote unitario. Por otro lado el TCT es más complicado de manejar, dado que implica otras áreas fuera de producción [2]. Así que se enfocara el análisis a caracterizar el TCM, el cual consta de los siguientes componentes:

- Tiempo de Puesta a Punto
- Tiempo de Procesamiento por Lote
- Tiempo de Transporte
- Tiempo de Espera.

2. Trabajo en Proceso

El trabajo en proceso es la cantidad de productos semiterminados, ya sea en proceso o en línea de espera para ser trabajados. Representa, en gran medida, la inversión hecha por la empresa en su proceso de producción; el uso de la maquinaria y los activos de la misma.

El inventario eleva los costos de producción mientras mayor sea el tiempo que un material permanece en planta. La tendencia actual es producir los artículos según se requieran considerando el inventario como una deficiencia. De hecho, el inventario es la evidencia de un diseño, distribución, coordinación y operación pobres del sistema de manufactura.

3. Utilización de la Máquina

Se podría asumir, en principio, que una máquina en constante uso es un buen signo de la eficiencia de la producción, y que una máquina parada es una inversión desperdiciada. Con base en este principio se procura entonces mantener produciendo el mayor número de horas. Algunas

veces esto genera inventario no deseado que debe ser desplazado en productos terminados, o ir a para en almacén.

Al respecto es necesario incluir el termino eficacia; que es el medir cuando es conveniente que la máquina opere y que debe producir. Así, cabe definir la utilización de la máquina como el tiempo de operación que cumple con la producción de una manera eficiente y que genera los productos efectivos para su mejor aprovechamiento. La utilización efectiva de un recuso es operar la maquinaria a producir exactamente la cantidad correcta de las cosas correctas en el tiempo correcto.

4. Tasa de Producción

Para un sistema de manufactura, la tasa de producción es generalmente expresada como una tasa diaria u horaria. Es el número de partes producidas por hora o por día; el reciproco de la tasa de producción es el tiempo de producción por unidad de producto. Considerando las facilidades dentro de la empresa, se habla de la velocidad con la que una máquina genera piezas con la calidad esperada.

5. Capacidad

La capacidad de la planta es la salida máxima posible del proceso de transformación de la planta misma que permanezca durante un periodo de tiempo especificado. Tiene un significado diferente para cada sistema de producción; particularmente, cuando la salida no es homogénea o cuando la planta produce una variedad de productos, se puede manejar la medida de capacidad como la disponibilidad de la máquinas en horas o la cantidad de piezas producidas por hora.

La capacidad es un término impreciso, implica planear promedios de eficiencia, absentismo, tiempo improductivo, fallas, etc. Tener mayor capacidad y el control de ésta, ayuda a la empresa a ser más rentable.

6. Flexibilidad

Un sistema flexible es aquel que es capaz de responder al cambio; como flexibilidad es la habilidad del sistema de responder efectivamente a tal cambio. El cambio de circunstancias incluye cambios internos y externos. Los cambios internos son cambios de estado del sistema como fallas, reparaciones, arranque de máquina, retraso, etc. Cambios de diseño, proceso, flujo, demanda, etc. son ejemplos de cambios externos. La habilidad de cubrir los cambios internos requiere cierto grado de redundancia en el sistema, donde la versatilidad y capacidad de producir diferentes tipos de piezas son cubiertos por los cambios externos.

El tiempo para producir una orden, la variedad de los productos, el tiempo y costo para cambiar ente un producto y otro diferente son factores en la competitividad del sistema de manufactura. De donde es claro que la flexibilidad es fundamental para lograr la competitividad. Así como la flexibilidad provee una ventaja estrategia para manejar el riesgo asociado al mercado incierto.

7. Confiabilidad y Desempeño

Un factor de mayor influencia en el desempeño del sistema es el paro no programado del equipo provocado por fallas. Dado que el arranque de cualquier sistema de manufactura tiene un alto costo, una alta productividad y remuneración son esenciales para sobrevivir.

Tradicionalmente la confiabilidad y la disponibilidad son medidas que concentran el porcentaje de falla o reparación. Confiabilidad de un sistema de manufactura es la probabilidad que, en condiciones establecidas de operación, se tendrá un buen desempeño durante un intervalo de tiempo para producir productos de calidad. La Disponibilidad es una medida de conveniencia para los sistemas con fallas y reparaciones; disponibilidad instantánea en un tiempo t de un sistema es la probabilidad de que el sistema sea operacional al tiempo t.

8. Calidad

Referida en gran medida a la apreciación del cliente, la calidad es un concepto que regula las características de un producto o servicio respecto a los beneficios que se obtienen de su compra. El cliente espera que el valor del producto tenga alguna relación con el precio. Esto implica que la compañía tiene la obligación de incluir en la demanda del cliente todos los valores

BIBLIOTECA
Y DE ESTUDIOS
88A30

intrínsecos y funcionales que dependen de la integridad de materiales y del proceso de manufactura.

El Control Total de la Calidad involucra el principio de "calidad en la fuente", lo que significa que todo error debe ser detectado y corregido en la fuente donde el trabajo se genera. Los principios básicos del control total de la calidad son:

- Control del proceso
- Insistencia en conformidad
- Inspección al 100%.

2.1.2 Herramientas para Modelar el Desempeño

Los métodos de evaluación para la mayoría de los sistemas de manufactura caen en dos clases: medición de desempeño y modelado del desempeño. Las medidas de desempeño se enfocan a la existencia, sistemas operacionales y son generalmente usados para monitoriar las variables clave, el diagnóstico de fallas y posibles reconfiguraciones. El modelado del desempeño de un sistema de manufactura puede realizarse por modelos de simulación o analíticos. Los modelos de simulación basan su exactitud en el detalle empleado en la construcción del algoritmo, como en el número de iteraciones realizadas. En cambio los modelos analíticos basan su exactitud y fidelidad con el sistema real de la complejidad de su concepción y detalle incluidos.

El análisis de las medidas de desempeño para una máquina operada en forma semimanual se consideran aquellas medidas aplicables que, por un lado nos den información suficiente para evaluar el desempeño del sistema, y por otro lado nos den los parámetros para evaluar el modelo de simulación desarrollado.

Respecto al tiempo, se distinguen dos análisis posibles al sistema, donde se manejan los conceptos de: Modelo Transitorio (después iniciar el sistema) y Modelo de estado estable. Una vez que el sistema arranca y mientras se producen los transcientes en la respuesta, se puede modelar al sistema mediante funciones en tiempo correspondiente al desempeño del mismo o por algún algoritmo de simulación. Cuando el sistema ha alcanzado la estabilidad o bien ha pasado

un tiempo prudente para observar los patrones o tendencias del funcionamiento se consideran los modelos en estado estable. Es en estado estable, donde se logra obtener mayor información de las medidas de desempeño del sistema que puedan ser manejadas de manera sencilla. Para la comparación de la respuesta de los sistemas, la respuesta en estado estable cumple con los objetivos planteados de manera suficiente. Con base en lo descrito como medidas de desempeño enfocadas a tiempos largos (estado estable), se manejan las medidas de desempeño siguientes:

1. Tiempo de Paso por la Máquina: A partir de la llegada de la materia prima el tiempo de paso es únicamente el transcurso desde que se alimenta a la máquina de inyección hasta el empaque de cada lote de piezas listas a trasladarse.

2. Trabajo en Proceso: Cantidad de piezas (posibles resultantes) que se encuentren en proceso o esperando a serlo. Involucra el número de unidades en línea de espera además de la actual trabajándose.

3. Utilización de la Máquina: Como solo es de interés de este estudio cada máquina vista de manera independiente, el tiempo de utilización contempla el tiempo efectivo que la máquina esta operando y existe materia prima a ser procesada. O bien, liberada la orden de producción, será el tiempo total de operación de la máquina contra los tiempos de paro por falla, falta de material, etc.

4. Tasa de Producción: Retomando el tiempo de procesamiento por lote, la tasa de producción será la velocidad con la que se producen las piezas medida por jornada de trabajo o cambio de turno.

2.2 PROCESOS DE LINEAS DE ESPERA

Todos los sistemas que involucran servidores y transacciones que esperan a ser atendidos pueden ser representados por modelos de líneas de espera. Las características comunes de los procesos de espera son: una razón de aleatoriedad del servicio, que en el caso de análisis es debida al operador, molde, horarios, u otros; el arribo de transacciones al sistema con la dependencia de otro departamento y las facilidades de transporte; y la lógica de operación del servidor. El desempeño completo de cada parte que comprende al sistema genera:

- Del punto de la transacción → espera de servicio
- Del servidor (utilización) → porcentaje de tiempo disponible

2.2.1 Teoría de Líneas de Espera

Una línea de espera es un sistema en el cual las transacciones llegan para recibir un servicio. Cuando los servidores están ocupados, las transacciones que arriban esperan su turno. Hasta que un servicio se completa, la transacción siguiente a ser servida es seleccionada de acuerdo a alguna disciplina de fila. Una vez que el servicio ha sido proporcionado la transacción sale del sistema. Los elementos básicos que forman una línea de espera son: los arribos, el mecanismo de servicio, y la disciplina de la fila. La figura 2.1) provee una representación pictórica del proceso.

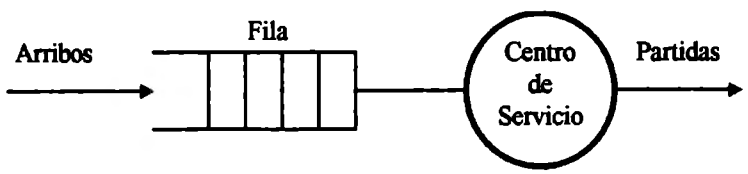


Figura 2.1) Esquema de Línea de Espera

Existen varios elementos que describen una línea de espera y se incluyen o varían de acuerdo al comportamiento real del sistema. Se numeran los siguientes elementos:

1. Transacción
2. Servicio
3. Intervalo de tiempo entre arribos
4. Tiempo de servicio
5. Arribos: individual/en masa
6. Disciplina de servicio
   a) FCFS (FIFO)
   b) LCFS(LIFO)
7. Prioridades
8. Configuración del servidor
   a) simple
   b) paralelo
   c) series
   d) red
9. Tamaño de la fila
   a) limitada
   b) ilimitada
10. Fuente de llamada
    a) finita (sistema cerrado)
    b) infinita (sistema abierto)
11. "Comportamiento de humano"
12. El servidor puede acelerar la rapidez de servicio
13. Las transacciones pueden saltar de una fila a otra
14. Las transacciones pueden no unirse a una fila anticipando tardanza
15. Las transacciones pueden claudicar de la fila en alguna ocasión.

2.2.2 Notación Estándar (Kendall modificado)

En conexión con las líneas de espera una notación corta conveniente ha sido desarrollada por Kendall, quien propuso un sistema de clasificación ampliamente usado en la actualidad [2]. Esta clasificación considera seis de las características mencionadas en la estructura de los modelos de líneas de espera, expresándolas en el formato

(a / b / c) : (d / e / f)

donde:

a - distribución de probabilidad entre arribos de transacciones

b - distribución de probabilidad del tiempo de servicio, partidas

c - número de servidores

d - disciplina de servicio (FCFS / LCFC / SIRO / GD)

e - capacidad máxima del sistema (c + fila)

f - tamaño de la fuente de llamadas.

Los símbolos usados para las distribuciones de a y b son:

D - Determinístico (constante)

E_k - Erlang con parámetro K

M - Markov: Poisson / Exponencial

H - Hiperexponencial

GD - Distribución General

GI - Entrada general

G - Servicio general.

Normalmente se busca que el proceso descrito en líneas de espera cuadre con algún caso desarrollado y para el cual existen ecuación de comportamiento. De acuerdo a los datos recolectados es posible determinar las distribuciones de los tiempos de arribo y servicio de las transacciones.

2.2.3 Procesos de Poisson

En sistemas que funcionan de manera azarosa, como el momento en que una máquina falla, las variables involucradas toman valores en cierta medida imprevisibles; con lo que el resultado final es incierto. Estas variables que pueden tomar valores inciertos son conocidas como variables aleatorias y normalmente se denotan por letras $\mathbf{X}$ *o* $\mathbf{Y}$. Y solo es de interés el valor numérico que puedan tomar $\{X = x\}$. Una variable aleatoria puede ser discreta o continua dependiendo del número finito o infinito de valores que puede tomar. La probabilidad es una manera de vincular una posibilidad a un evento. Se escribe $\Pr\{X = x_t\}$ para la probabilidad de que el evento $\{X = x_t\}$ ocurra. El proceso se representa por su función de probabilidad o distribución de probabilidad, definida por $\Pr\{X = x\} = f(x)$. Un proceso de Poisson se distingue por características como:

- **Propiedad de perdida de memoria**.- el tiempo recurrente siguiente tiene la misma distribución que el intervalo actual.
- **Los eventos suceden uno a la vez**.- en el límite de un intervalo la probabilidad de que ocurra más de un evento es cero y tiene un incremento estacionario independiente.
- **La velocidad de arribo es constante** λ.- el intervalo ΔT entre cualquier eventos consecutivos tiene distribución exponencial: $P(t < T) = 1 - e^{-\lambda T}$.

El Número de eventos durante cualquier periodo "T" tiene distribución de Poisson con función másica asociada

$$P_n(T) = \frac{(\lambda T)^n}{n!} e^{-\lambda T}$$ con el valor principal λT.

El proceso de Poisson es un proceso estocástico continuo con espacio de estado discreto, las propiedades que se le atribuyen lo hacen muy popular y una opción común en la elección de modelos de arribo de partes en alguna facilidad de la manufactura. Los procesos de Poisson derivan de las variables aleatorias de Poisson y tienen una relación estrecha con la propiedad de perdida de memoria siendo los tiempos de arribo independientes y con variables aleatorias exponenciales idénticas.

Para una línea de espera se considera A_1, A_2,... una secuencia arbitraria de arribo de transacciones con t_j = intervalos de arribo de $A_j(0 \le t_1 \le t_2 < ... < \infty)$ y $T_j = t_{j+1} - t_j$ (arribos intermedios entre A_j y A_{j+1}). Las transacciones que arriban pero no han salido, se dice que permanece en el sistema $X(t)$. Mientras que en el sistema, una transacción puede estar en servicio $X_s(t)$ o en espera $X_q(t)$. Toda transacción requiere tener un servicio. Definiendo las variables de funcionamiento del servidor y la línea de espera a un tiempo t, se calculan las medias de desempeño como la suma de las variables involucradas durante el tiempo de simulación cuando $t \to \infty$.

2.2.4 Medidas de Desempeño de Líneas de Espera

Una vez definido el sistema de línea de espera apropiado se concentra el enfoque del análisis en el tiempo; donde se manejan los conceptos de:

1. Modo Transitorio
2. Modo de estado estable
   a) todos los Pn(t) son constantes
   b) número de arribos = número de partidas

Como la finalidad del estudio es determinar en periodos largos la operación del sistema se considera el modo de estado estacionario. En el modo de estado estable la rapidez del flujo entrando y saliendo de cualquier estado son iguales.

Entra al Sistema = Sale del Sistema

El desempeño de una fila se determina en términos de uno o más de los procesos estocásticos siguientes: $\{X(t): t \geq 0\}$, $\{X_s(t): t \geq 0\}$ $\{X_q(t): t \geq 0\}$, $\{W_j : j \in \mathbf{N}\}$, etc. En un periodo considerable de tiempo, las medidas de desempeño de interés se definen como limites que son los promedios de tiempos y transacciones analizadas. Con aplicación para cualquier línea de espera, se definen las medidas de desempeño genéricas correspondientes a estado estacionario de líneas de espera.

1. Número promedio de transacciones en el sistema: $L = \lim_{t \to \infty} \frac{1}{t} \int_0^t X(u)du$
2. Número promedio en fila (valor medio de la fila): $Q = \lim_{t \to \infty} \frac{1}{t} \int_0^t X_q(u)du$
3. Número promedio en servicio: $B = \lim_{t \to \infty} \frac{1}{t} \int_0^t X_s(u)du$
4. Utilización promedio del servidor: $U = \frac{B}{c}$

5. Tiempo de espera promedio en el sistema: $W = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} W_j$

6. Tiempo promedio de espera en fila: $D = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} D_j$

Modelando el sistema de inyección de plástico con las medidas anteriores, se pueden calcular: el trabajo en proceso, la utilización de la máquina, el tiempo de paso, etc. En las medidas anteriores L,Q,B y U son promedios en tiempo, mientras que W y D son medidas de promedios de transacciones.

Un resultado importante en el contexto de líneas de espera es la simplificación de estas reglas en las "pequeñas fórmulas". El resultado establece que, dado una línea de espera, si los límites $\lambda = \lim_{t\to\infty} \frac{x_A(t)}{t}$ y $W = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} W_j$ existen con $\lambda < \infty$ y $W < \infty$, entonces el siguiente límite

$$L = \lim_{t\to\infty} \frac{1}{t} \int_0^t X(u)du \text{ existe}$$

donde $L < \infty$ y $\mathbf{L} = \lambda \mathbf{W}$

Además definiendo que λ y D existen con $D < \infty$ entonces el límite Q existe, con $Q < \infty$ y $\mathbf{Q} = \lambda \mathbf{D}$. Estos resultado son aplicables a una línea aislada con cualquier distribución.

2.3 MODELADO POR ALGORITMO DE SIMULACION

2.3.1 Modelos de Simulación

Simulación es el desarrollo de un modelo lógico - matemático de un sistema, de forma de obtener la operación de un proceso real de un sistema a través del tiempo en forma artificial. Sea realizado a mano o en una computadora, la simulación involucra la generación de una historia artificial de un sistema; de la cual se puede inferir las características operacionales del sistema. El desarrollo del modelo incluye la construcción de ecuaciones lógicas representativas del sistema o algoritmo y la realización de un programa computacional. Una vez que se ha validado el modelo del sistema se experimenta con el modelo para determinar cómo responde el sistema a cambios en los niveles de algunas variables de entrada [6]. La simulación resuelve varios problemas, ejemplos:

- Diseño y análisis de sistemas de manufactura.
- Evaluación de requerimientos Hardware y Software de un sistema de computo.
- Evaluación de un nuevo sistema de armas militares o tácticas.
- Determinar políticas de orden para un sistema de inventario.
- Diseño de sistemas de comunicaciones y protocolos para ellos.
- Diseño y operación de facilidades de transporte en aeropuertos, vías de ferrocarril, etc.
- Evaluar diseños de organizaciones de servicio como hospitales, restaurantes, etc.
- Analizar sistemas financieros y económicos.

2.3.2 Simulación de Eventos Discretos

La simulación de eventos discretos maneja el modelo de un sistema que evoluciona en tiempo como una representación en la cual las variables de estado cambian instantáneamente en

puntos específicos de tiempos. Estos puntos en el tiempo indican donde los eventos ocurren; donde un evento es definido como la ocurrencia instantánea que puede cambiar el estado del sistema. La simulación de eventos discretos puede conceptualmente ser calculada manualmente; sin embargo, el tamaño de datos que maneja para la mayoría de sistemas reales que simula, la simulación se realiza por computadora.

Aunque la simulación ha sido aplicada a una gran diversidad de sistemas reales, todos los modelos de simulación de eventos discretos comparten un número de componentes y existe una organización lógica para estos componentes que promueve la codificación. En particular, los siguientes componentes se encuentran en el modelo de simulación de eventos discretos usando la aproximación del evento siguiente en avance de tiempo.

- **Estado del Sistema**. La colección de variables de estado necesarias para describir el sistema en un tiempo específico.
- **Reloj de la Simulación**. La variable que da el valor actual del tiempo simulado.
- **Lista de Evento**. Una lista que contiene el tiempo siguiente cuando cada tipo de evento ocurra.
- **Contadores estadísticos**. Variables usadas para guardar la información estadística del desempeño del sistema.
- **Rutina de Inicialización**. Un subprograma para inicializar el modelo de simulación al tiempo cero.
- **Rutina de temporización**. Un subprograma que determina el evento siguiente a partir del evento que ocurre (no siempre existe la rutina de evento para cada tipo de evento).
- **Rutinas de Librería**. Un conjunto de subprogramas usados para generar las observaciones aleatorias de las funciones de distribución que fueron determinadas como parte como parte del modelo de simulación.
- **Generador de Reportes**. Un subprograma que calcula los estimados (de los contadores estadísticos) de las mediciones deseadas del desempeño y produce un reporte cuando la simulación termina.
- **Programa Principal**. Un subprograma que involucra la rutina de tiempo para determinar el evento siguiente y transfieren luego, el control a la correspondiente rutina de evento para

actualizar el sistema al estado actual apropiadamente. El programa principal puede también revisar la terminación y llamar al Generador de Reporte cuando la simulación termina [6].

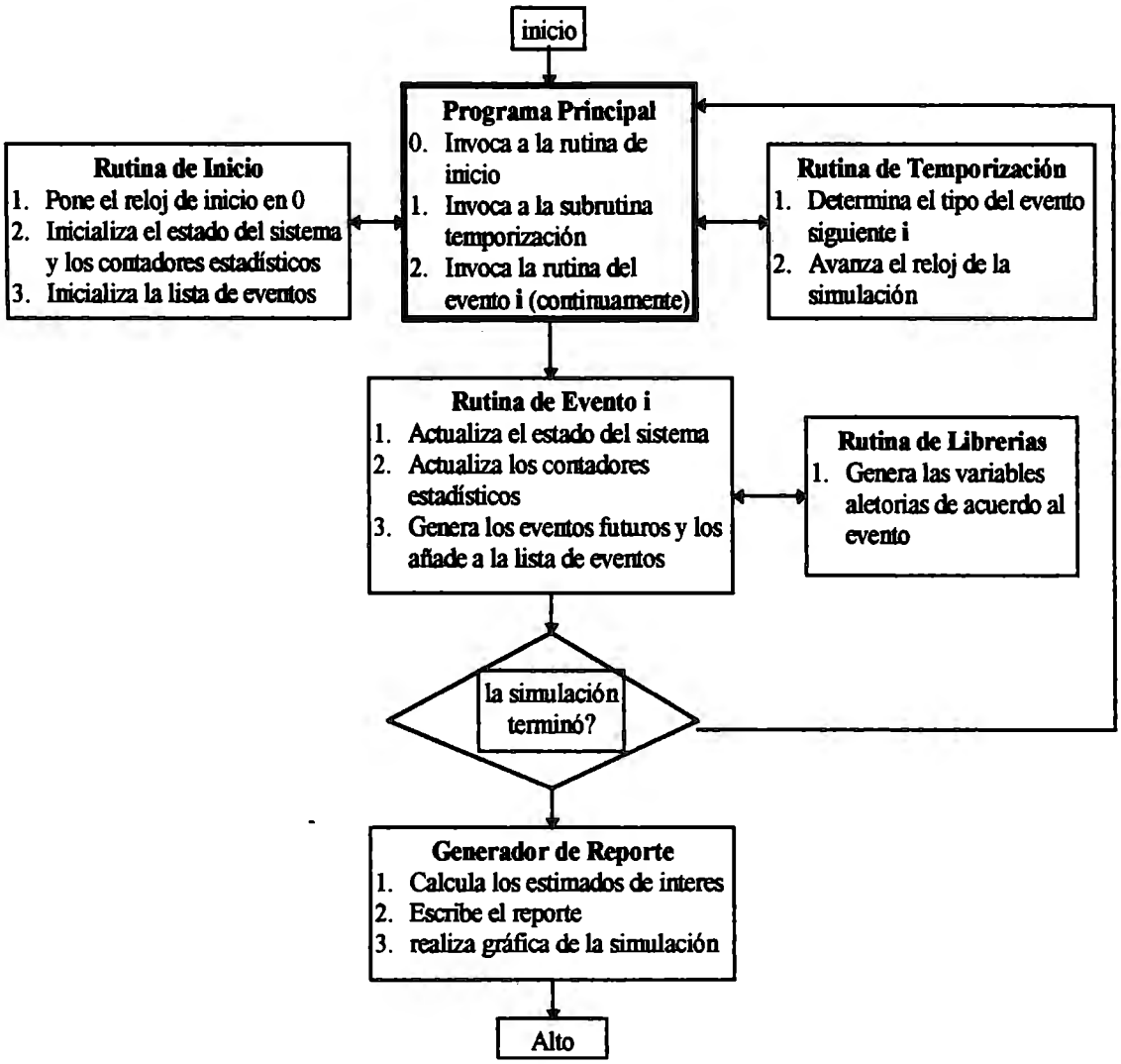


Figura 2.2) Flujo de Control de la aproximación por evento siguiente

Un proceso estocástico es una secuencia de variables aleatorias caracterizado por la distribución conjunta de cualquier colección finita de sus variables aleatorias que la componen. Una manera de analizar el problema es definir un proceso estocástico vía un algoritmo que genere sus rutas muestras, en lugar de especificar la distribución conjunta de sus variables aleatorias que la componen directamente.

Los modelos de sistemas dinámicos que son sujetos a la incertidumbre son llamados procesos estocásticos. Un proceso estocástico es simplemente una secuencia de variables

aleatorias ordenadas por un índice. Por ejemplo, las variables aleatorias X_0, X_1, $X_2, \ldots$ forman una proceso estocástico ordenado por el conjunto de índices $\{0,1,2,\ldots\}$, denotado por $\{\mathbf{X}_n; n=0,1,2,..\}$. También se consideran los procesos estocásticos en el que los índices es un conjunto continuo, por ejemplo, el proceso estocástico $\{\mathbf{Y}_t; t \geq 0\}$, que está ordenado por el conjunto de índices $\{t \geq 0\}$.

Los índices n y t son comúnmente referidos como el "*tiempo*", $\mathbf{X}_n$ para un proceso en tiempo discreto y $\mathbf{Y}_t$ para procesos continuos. El rango (los posibles valores) de las variables aleatorias en un proceso estocástico es llamado el "*espacio de estado*" $\{\mathbf{S}_n; n=0,1,2,..\}$del proceso. Este espacio de estado puede ser multidimensional, en cuyo caso el proceso estocástico es una secuencia ordenada de vectores aleatorios.

Un modelo genérico de procesos estocásticos consiste de los siguientes componentes:

- **Proceso de cambio de estado** $\{\mathbf{X}_n; n=0,1,2,..\}$, es un proceso en tiempo discreto, posiblemente mezclando estados discretos y continuos. El proceso del sistema representa toda la información relevante del estado del sistema $\{\mathbf{S}_n; n=0,1,2,..\}$ que esta incluido en el modelo.
- **Proceso de época de evento** $\{\mathbf{T}_n; n=0,1,2,...\}$, está definido por $T_{n+1} \equiv \min\{C_i\}$; es un proceso continuo o discreto donde T_n es el tiempo del enésimo evento del sistema.
- **Proceso de salida** $\{\mathbf{Y}_t; t \geq 0\}$, está definido por $\mathbf{Y}_t \leftarrow \mathbf{X}_n$ cuando $T_n \leq t < T_{n+1}$; es un proceso continuo con el mismo espacio de estado como $\mathbf{X}_n$ y conecta con los cambios de estado a los tiempos donde ellos ocurren.
- **Algoritmo de Simulación**. El cambio de estado, época del evento y el proceso de salida están definidos por k eventos de sistema $e_1, e_2, e_3, .. e_k$, un evento inicial del sistema e_0, los relojes $\mathbf{C} = (C_1, C_2, ..., C_k)'$.
- **Ruta Muestra**. Una ruta muestra es una colección de datos ordenados en tiempo que describen el comportamiento de un proceso dinámico en un instante.

Algoritmo_de_Simulación

1. $n \leftarrow 0$	(inicia el contador de eventos del sistema)
$T_0 \leftarrow 0$	(inicia la época de evento)
$e_o(\,)$	(ejecuta el evento inicial del sistema)
2. $T_{n+1} \leftarrow \min\{C_i\}$	(avanza el tiempo al próximo evento pendiente)
$I \leftarrow \text{argmin}\{C_i\}$	(encuentra el índice del evento próximo del sistema)
3. $\mathbf{S}_{n+1} \leftarrow \mathbf{S}_n$	(temporalmente mantiene el estado del sistema previo)
$\mathbf{C}_i \leftarrow \infty$	(el evento I no esta pendiente)
4. $e_I(\,)$	(ejecuta el evento I del sistema)
$n \leftarrow n+1$	(actualiza el contador de evento)
5. repita 2	

Las funciones del sistema e_I, cumplen dos tareas: Actualizan el sistema al estado $\mathbf{S}_{n+1}$ del estado previo del sistema $\mathbf{S}_n$, y inician los relojes $\mathbf{C}_i$, cuando es necesario. Este algoritmo de simulación está definido de modo que la única información que requiere para pasar del estado $(\mathbf{S}_n, \mathbf{C}_i)$ al estado $(\mathbf{S}_{n+1}, \mathbf{C}_i)$ son los valores de $\mathbf{S}_n$ y $\mathbf{C}_i$. No se requiere información del proceso en las épocas de eventos 0, 1, ..., $n-1$. Lo que es conveniente, porque no se requiere guardar la ruta muestra completa hasta el evento n, y eso es una propiedad fundamental que se explota al analizar rutas muestras. El algoritmo de simulación presentado tiene una implementación computacional natural, y forma la base de muchos lenguajes de simulación por computadora. El fin del algoritmo puede obedecer a un número preestablecido de eventos simulados o que el algoritmo alcance el tiempo marcado.

Los procesos estocásticos $\{S_n; n=0,1,...\}$ y $\{T_n; n=0,1,...\}$ del algoritmo son generados automáticamente por simulación. La colección de variables aleatorias ordenadas en tiempo representan las posibles rutas muestra. Usualmente es de interés del desarrollo del sistema en el tiempo, por lo que es común derivar otro proceso estocástico que combine ambos tipos de información. Para lo cual se considera para $t \geq 0$, $T_n \leftarrow S_n$ localizado entre $T_n \leq t \leq T_{n+1}$. El proceso estocástico $\{\mathbf{Y}_n; t \geq 0\}$, que es un registro del estado del sistema en tiempo continuo t, contiene

información acerca del estado del sistema y cuanto tiempo el sistema visita un estado en particular. El análisis en Estado Estable se logra aumentando el numero de iteraciones del ciclo de eventos; además, se realizan varias replicas del algoritmo. De los resultados arrojados, es posible determinar por un lado la tendencia del sistema en tiempos largos y, por otro lado, se observa la aleatoriaedad entre muestras o si existe alguna periodicidad.

2.3.3 Medidas de Desempeño

Para la ruta muestra de $\mathbf{Y}_t$ en función de t se puede calcular su promedio para el enésimo evento de época por la formula

$$\bar{Y} \equiv \frac{\int_{T_0}^{T_n} Y_t dt}{T_n - T_0} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (T_j - T_{j-1}) S_{j-1}}{T_n - T_0}$$

Para varios procesos $\mathbf{Y}_t$ de salida que se requieran registrar podemos definir $\bar{Y}$ como el promedio de cada $\mathbf{Y}_{i,t}$ en el intervalo $T_n - T_0$. La integral para encontrar puede sustituirse una suma, la cual puede ser calculada actualizando el área después de cada evento del sistema, $area \leftarrow area + (T_n - T_{n-1}) S_{n-1}$. Partiendo de las medidas de desempeño generales para Líneas de Espera, se obtienen las medidas para el modelo de simulación.

1. Numero de Transacciones en el Sistema

$$L = \frac{\int_{T_0}^{T_n} N dt}{T_n - T_0} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (T_j - T_{j-1}) N_{j-1}}{T_n - T_0}$$

2. Número de Promedio de Transacciones en Línea de Espera

$$Q = \frac{\int_{T_0}^{T_n} Nq dt}{T_n - T_0} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (T_j - T_{j-1}) Nq_{j-1}}{T_n - T_0}$$

3. Número de Promedio de Transacciones en Servicio, Utilización de la Máquina

$$B = U = \frac{\int_{T_0}^{T_n} Sdt}{T_n - T_0} = \frac{\sum_{j=1}^{n} (T_j - T_{j-1}) S_{j-1}}{T_n - T_0}$$

4. Tiempo Promedio de Espera en el Sistema

$$W = \frac{L}{\lambda}$$

5. Tiempo promedio de Espera en Línea

$$D = \frac{Q}{\lambda}$$

2.3.3 Generación de Variable Aleatorias

Dada una distribución $F(x)$ se requiere generar *m* números de manera que, antes de generarlos, los estatutos de probabilidad de sus valores se pueden derivar considerándolos como variables aleatorias independientes en tiempo estacionario. Y, después de generados, el análisis estadístico soporte la hipótesis de que ellos son una muestra independiente en tiempo estacionario del modelo $F(x)$. Para lograrlo, es necesario tener una manera para generar valores de una distribución de probabilidad específica F_U ; suponiendo que se cuenta con una función *random*(), que proporcione tales números.

Primero se tiene que cualquier variable aleatoria la podemos definir en función de otra variable U que tiene una distribución uniforme en [0,1]. Como *random*() genera valores para U se pueden, por lo tanto, generar valores para cualquier variable aleatoria. El algoritmo siguiente genera valores de cualquier distribución discreta. Dada una función *random*() regresa el valor de U de la función uniforme en [0,1].

Algoritmo_fcf_inversa_discreta

1. $U \leftarrow random()$

$i \leftarrow 1$

2. hasta que $U \leq F_X(a_i)$

haz

$i \leftarrow i+1$

fin

3. $X \leftarrow a_i$

4. regresa X

Cuando la variable aleatoria Y es continua en un rango, por ejemplo la distribución exponencial; no existen brincos en F_Y para usar la partición [0,1]. Pero, análogamente que para valores de U, se genera un conjunto de Y igual al valor de a para $F_Y(a)$; es decir, se pretende una $F_Y(Y)=U$. Para cualquier distribución continua la solución de $F_Y(Y)=U$ en términos de Y se denota por $Y=F_Y^{-1}(U)$, la función de distribución inversa. La siguiente derivación muestra que la función inversa define una variable aleatoria Y con distribución F_Y:

$$\begin{aligned}\Pr\{Y \le a\} &= \Pr\{F_Y^{-1}(U) \le a\} \\ &= \Pr\{F_Y[F_Y^{-1}(U)] \le F_Y(a)\} \\ &= \Pr\{U \le F_Y(a)\} \\ &= F_Y(a)\end{aligned}$$

El siguiente algoritmo genera valores de cualquier función creciente continua:

Algoritmo_distribución_inversa_continua

1. $U \leftarrow$ *random*()

2. $Y \leftarrow F_Y^{-1}(U)$

3. regresa Y

Una vez probado que llamadas repetidas a la función *random*() regresan resultados independientes, se generan m valores independientes en tiempo estacionario de F. Repitiendo varias veces el algoritmo *Algoritmo_fcf_inversa_discreta* o *Algoritmo_fcf_inversa_continua* según los requerimientos. Esta idea llamada "*generación de variables aleatorias*" es una manera en que un modelo de probabilidad puede generar valores [5].

3 MODELADO DEL SISTEMA

Con los datos obtenidos se puede pensar modelar al sistema como un proceso de Líneas de Espera. Las máquinas son en este caso los servidores y se puede hablar de dos procesos relacionados. El arribo de materia prima como las transacciones y una velocidad de servicio. Así mismo se incluyen, el proceso en que se llenan las cajas con piezas, el producto terminado y la velocidad con la que son retiradas del área para ser llevadas a almacén. El diagrama de la figura 3.1) representa el proceso de transacción / servidor para un servidor independiente con diferente tiempo de servicio que algún otro servidor.

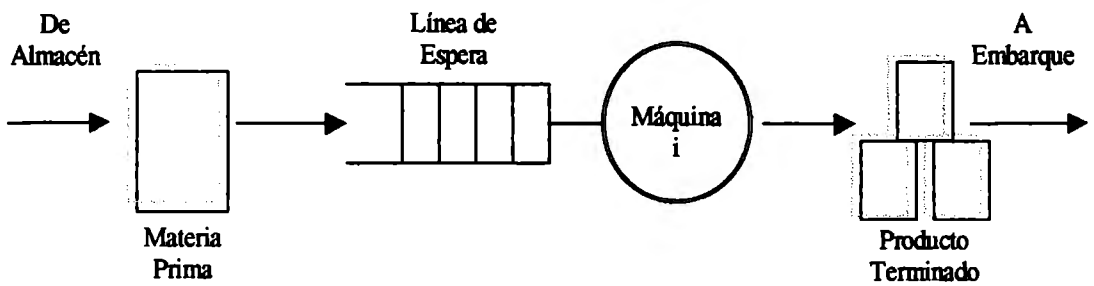


Figura 3.1) Máquina I de Nave D

En el diagrama del proceso de la nave D considera pequeños defectos en la producción; como son: piezas defectuosas como resultado de pruebas, defectos por proceso o cambio de color en la producción. Los paros de la máquina por fallas de mayor índole no se consideran, ya que se espera el modelo represente el comportamiento del sistema en estado permanente o para el caso de este primer análisis cuando se tiene producción casi continua.

Cuando existe una falla de la máquina y, dependiendo de su duración, existe una discontinuidad en la producción y el sistema se detiene. Sin embargo, el arribo de materia prima continua esperando una corrección rápida de la falla. El comportamiento para cada máquina se puede representar figura 3.2). En la figura se representan los estados del sistema: 1)en servicio, 0)en falla; y el número de elementos en línea de espera.

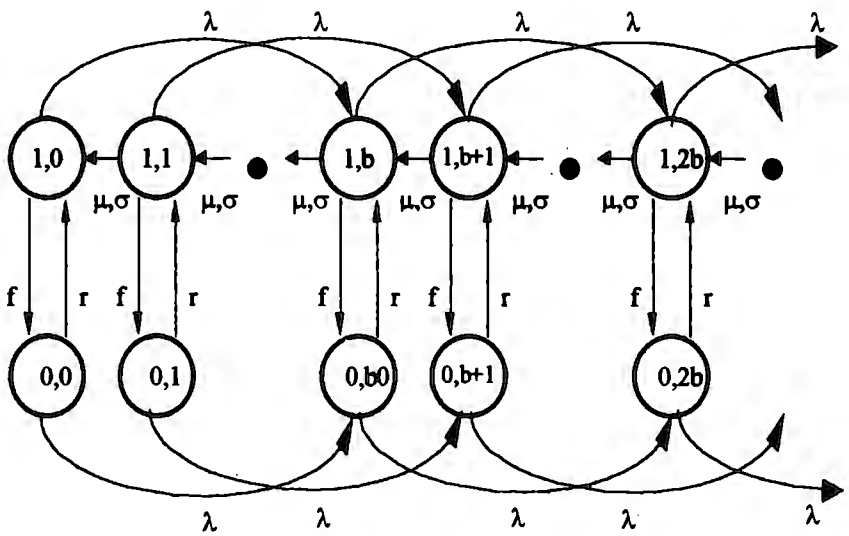


Figura 3.2) Diagrama para máquina I con fallas y arribo en paquete

3.1 ALGORITMO DE SIMULACION PARA LINEAS DE ESPERA EN PARALELO

En el proceso de inyección de plástico del área "D", cada máquina de inyección se considera un servidor independiente y el flujo de materia prima en el área como la variable del sistema dinámico a analizar. Como se describió en el planteamiento del problema, el área de análisis cuenta con cuatro servidores designados como:

- Servidor 1.- Máquina de inyección D01
- Servidor 2.- Máquina de Inyección D02
- Servidor 3.- Máquina de Inyección D03
- Servidor 4.- Montacargas compartido por el Area "D"

De acuerdo a las distribuciones de arribos, servicios y recolección, se generan los valores de las variables aleatorias que gobiernan los estados correspondientes en un tiempo T. Los estados posibles para cada línea de espera son:

- Arribo de Cajas con Materia Prima
- Producción de Piezas Moldeadas en Cajas de Producto Terminado
- Paro de Producción por Falla Menor
- Restablecimiento de funciones por Reparación
- Recolección de Producto Terminado del Area por el Montacargas (Servidor 4)

Las variables aleatorias de entrada que describen el sistema son:

- VAr_{ik} .- variable de arribo a cada máquina: VAr_{i1} =Parámetro 1, VAr_{i2} =Parámetro 2 de la distribución; VAr_{i3} = Número de transacciones por arribo.
- $V\,\mathrm{Pr}_{ik}$.- variable de servicio para cada máquina: $V\,\mathrm{Pr}_{i1}$ =Parámetro 1, $V\,\mathrm{Pr}_{i2}$ =Parámetro 2 de la distribución; $V\,\mathrm{Pr}_{i3}$ = Número de transacciones procesadas en un servicio.
- VFa_{ik} .- variable de falla de cada máquina: VFa_{i1} =Parámetro 1, VFa_{i2} =Parámetro 2 de la distribución.
- VRp_{ik} .- variable de reparación de cada máquina: VRp_{i1} =Parámetro 1, VRp_{i2} =Parámetro 2 de la distribución.
- VRc_{ik} .- variable del recolector de producto de terminado, común para todas la máquinas: VRc_{i1} =Parámetro 1, VRc_{i2} =Parámetro 2 de distribución; VRc_{i3} = Número de transacciones recolectadas por máquina.

Los eventos que describen al proceso de acuerdo a su importancia en el sistema son:

- Arribo de unidades de cierto volumen de materia prima como grupo de transacciones que llegan en conjunto para producir un número proyectado de piezas (e_{i1}, con reloj C_{i1}).
- Generación de piezas, posteriormente empacadas como producto terminado (e_{i2}, con reloj C_{i2}).
- Paro de producción por falla menor (e_{i3}, con reloj C_{i3}).
- Reparación del molde o máquina para continuar la producción (e_{i4}, con reloj C_{i4}).
- Recolección de Producto terminado con límite de transporte de piezas (e_{i5} con reloj C_{i5})

El estado del sistema que representa, en un tiempo T_n, los eventos adjudicados a cada servidor se describen por $\mathbf{S}_{i,n}$, justo después de la enésima época del proceso de cambio de estado por:

$$\mathbf{S}_{i,n} = \begin{pmatrix} XPP_j \\ XPT_j \\ XFA_j \\ XRC_j \\ XSE_j \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} VAr_k \\ V\,\mathrm{Pr}_k \\ VFa_k \\ VRp_k \\ VRc_k \end{pmatrix}$$

donde:

- $i = 1,...,3$.- define el servidor
- $i = 1,...,5$.- define el evento
- $k = 1,...,3$.- define cada parámetro de las variables: 1) y 2) parámetros, 3) unidades por vez
- $n = 0,...,N$.- contador de eventos del sistema
- XPP_j .- es el número de piezas proyectadas que pueden salir de una unidad de materia prima
- XPT_j .- es el número de cajas con producto terminado por número de piezas inyectadas
- XFA_j .- es el indicador de existencia de alguna falla en el proceso de producción
- XRC_j .- es el número de piezas recolectadas en una ronda del montacargas
- XSE_j .- es el indicador de operación de cada máquina de inyección.

Ahora bien, el proceso de salida $\mathbf{Y}_{i,n}$ reproduce el comportamiento del proceso en un tiempo T_n dentro del intervalo designado. Comprende los valores representativos para cada servidor y está descrito por:

$$\mathbf{Y}_{i,n} = \begin{pmatrix} Ya_{i,m,n} \\ Yp_{i,m,n} \\ Yf_{i,m,n} \\ Yc_{i,m,n} \\ Ys_{i,m,n} \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} XPP_i \\ XPT_i \\ XFA_i \\ XRC_i \\ XSE_i \end{pmatrix} \text{ para } T_n \le t \le T_{n+1} \text{ ; con :}$$

- $m = 1,2$.- Variable de salida: 1) valor, 2) tiempo
- $Ya_{i,n}$.- unidades en línea de espera.
- $Yp_{i,n}$.- unidades salientes.
- $Ys_{i,n}$.- unidades recolectadas.
- $Yf_{i,n}$.- falla del servidor.
- $Ys_{i,n}$.- máquina en servicio.

El sistema empieza cada ciclo de producción con cero clientes presentes y la máquina de inyección disponible, se inician las variables de entrada y salida para $i = 1,..,5$. Se calcula, además, el tiempo siguiente de cada evento del sistema. Estas condiciones iniciales con incluidas en evento del sistema e_{i0} :

$e_{i0}( )$	**(inicio de producción)**
$\mathbf{S}_{io} \leftarrow \mathbf{0}$	inicio de variables de estado del sistema
$\mathbf{Y}_{ij0} \leftarrow \mathbf{0}, \mathbf{T_0}$	inicio de variables de salida
$\mathbf{C}_{ij} \leftarrow \infty$	indicar ningún evento pendiente
$C_{i1} \leftarrow T_n + F_{i1}^{-1}(VAr_k)$	programación del primer arribo

Cuando arriba materia prima al proceso, dependiendo del estado de la máquina, se acumula en línea de espera es atendida y se programa el tiempo de la próxima llegada de material en e_{i1} :

$e_{i1}( )$	**(llegada de material)**
Si $\{(SE_i = 0) y (FA_i = 0)\}$	¿máquina disponible?
entonces	
$SE_i \leftarrow 1$	máquina ocupada
$C_{i2} \leftarrow T_n + F_{i2}^{-1}(V\,\mathrm{Pr}_k)$	se programa tiempo de producción
$PP_i \leftarrow PP_i + VAr_3$	aumenta línea de espera

$C_{i1} \leftarrow T_n + F_{i1}^{-1}(VAr_k)$ se programa próxima llegada

$Ya_{ijn} \leftarrow PP_i/VAr_3, T_n$ guarda cantidad en línea de espera

El evento del sistema e_{i2} actualiza el estado y los relojes cuando una pieza termina de ser procesada. Lo que ocurra después depende de la existencia de otra pieza esperando:

$e_{i2}( )$ **(producción de una pieza)**

Si $\{PP_i = 0\}$ ¿no hay piezas a producir?

entonces

$SE_i \leftarrow 0$ máquina libre

No

$PP_i \leftarrow PP_i - V\Pr_3$ disminuye línea de espera

$C_{i2} \leftarrow T_n + F_{i2}^{-1}(V\Pr_k)$ se programa tiempo de producción

$PT_i + PT_i + V\Pr_3$

Si $\{C_{i3} = \infty\}$ entonces $C_{i3} \leftarrow T_n + F_{i3}^{-1}(VFa_k)$ se programa falla

Si $\{C_{i5} = \infty\}$ entonces $C_{i5} \leftarrow T_n + F_{i5}^{-1}(VRc_k)$ se programa recolección

$Yp_{ijn} \leftarrow PT_i/V\Pr_3, T_n$ guarda cantidad de producto terminado

$Ya_{ijn} \leftarrow PP_i/VAr_3, T_n$ guarda cantidad en línea de espera

Otro evento del proceso es el paro de la máquina de inyección por alguna falla menor; según se indicó con anterioridad. Una falla del sistema deja fuera de servicio a la máquina, opera el tiempo de reparación y no programa la recolección de material. Tal como se aprecia en el evento e_{i3}:

$e_{i3}( )$ **(falla menor en el proceso de producción)**

$SE_i \leftarrow 0$ máquina libre

$FA_i \leftarrow 1$ falla presente

$C_{i2} \leftarrow \infty$ se deja de producir piezas

$C_{i4} \leftarrow T_n + F_{i4}^{-1}(VFa_{ik})$ programa reparación de falla

$Yf_i \leftarrow FA_i, T_n$ guarda presencia de falla

El tiempo de restablecimiento del proceso una vez que la falla ha sido reparada, esto es e_{i4}:

$e_{i4}(\,)$ **(reparación de falla menor en el proceso)**

$SE_i \leftarrow 0$ máquina libre

$FA_i \leftarrow 0$ compostura de falla

Si $\{PP_i > 0\}$ entonces $C_{i2} \leftarrow T_n + F_{i2}^{-1}(V\,\mathrm{Pr}_{ik})$ programa producción

$Yf_i \leftarrow FAi, T_n$ guarda ausencia de falla

Una vez que la máquina está produciendo se programa la recolección de piezas empaquetadas; el evento e_{i5}, para toda i, da cuenta del desalojo de producto terminado. La variable aleatoria que determina el tiempo de recolección es determinada finalmente por análisis de la respuesta del proceso. En la primera ocasión esta variable es propuesta con base en datos anteriores:

$e_{i5}(\,)$ **(recolección de producto terminado)**

Si $\{SE_i = 1\}$ entonces $C_{15} \leftarrow T_n + F_{15}^{-1}(VRc_{1k})$ pregunta por continuidad de trabajo

$RE_1 \leftarrow 0$ inicia recolector

para $i = 1,2,3$

mientras $\{(RE_1 < VRc_{i3}) y (PTi \geq 1)\}$ capacidad del recolector

hacer

$RE_1 \leftarrow RE_1 + 1$ carga recolector

$PT_i \leftarrow PT_i - 1$ disminuye producto terminado

fin

$Yc_1 \leftarrow RE_1, T_n$ guarda producto recolectado

$Yp_i \leftarrow PT_i, T_n$ guarda producto terminado

Y el algoritmo principal correspondiente para el proceso de inyección es el siguiente:

Algoritmo_de_Simulación

1. $n \leftarrow 0$	(inicializa el contador de eventos del sistema)
$T_0 \leftarrow 0$	(inicializa la (época) de evento)
$e_{i0}( )$	(ejecuta el evento inicial del sistema)
2. $T_{n+1} \leftarrow \min\{C_{ij}\}$	(avanza el tiempo al próximo evento pendiente)
$i, j \leftarrow \arg\min\{C_{ij}\}$	(encuentra el índice del evento próximo del sistema)
3. $\mathbf{S_{n+1}} \leftarrow \mathbf{S_n}$	(temporalmente mantiene el estado del previo)
$\mathbf{C_{ij}} \leftarrow \infty$	(el evento I no esta pendiente)
4. $e_{ij}( )$	(ejecuta el evento I del sistema)
$n \leftarrow n + 1$	(actualiza el contador de evento)
5. repita 2 hasta $n = N$	

El fin del algoritmo de simulación se establece obtenerse especificando el número máximo de eventos o un tiempo de simulación. Este control depende de la validez de la simulación en las circunstancias como opere el sistema.

Una vez terminada la simulación toma lugar el análisis de las variables de salida registradas durante la corrida del algoritmo. Los valores $\mathbf{Y_{1,n}}$ registrados muestran el comportamiento del proceso y a partir de estos datos encontrar las medidas de desempeño del sistema. Se consideran principalmente las siguientes medidas de desempeño validas en cualquier sistema de manufactura, las cuales son un indicador del nivel de competencia en este caso del sistema de inyección de piezas de plástico:

1. Trabajo en Proceso
2. Tiempo promedio de espera en el sistema
3. Producto en Línea de Espera
4. Tiempo promedio en Línea de Espera
5. Utilización de la Máquina

Trabajo en Proceso.- Considerado como la cantidad promedio de la materia prima en línea de espera Ya_1 mas la que se procesa en la máquina Ys_1 durante todo el tiempo de la simulación.

$$L = \frac{\sum_{j=1}^{n}(T_j - T_{j-1})Ya_{1,j-1} + \sum_{j=1}^{n}(T_j - T_{j-1})Ys_{1,j-1}}{T_n - T_0}$$

Trabajo en Línea de Espera.- Materia prima que espera a ser procesada en Ya_1 durante el tiempo de la simulación.

$$Q = \frac{\sum_{j=1}^{n}(T_j - T_{j-1})Ya_{1,j-1}}{T_n - T_0}$$

Trabajo en Servicio.- Es la fracción promedio de trabajo en la máquina. En este caso, como únicamente existe un servidor equivale a la utilización del servidor.

$$B = U = \frac{\sum_{j=1}^{n}(T_j - T_{j-1})Ys_{1,j-1}}{T_n - T_0}$$

Tiempo de Espera en el Sistema.- Es el tiempo promedio que permanece una pieza en el sistema.

$$W = \frac{L}{N_1 \lambda}$$

Tiempo de Espera en el Línea.- Es el tiempo promedio que permanece una pieza en la fila de espera.

$$D = \frac{Q}{N_1 \lambda}$$

Las medidas de desempeño se aplican independiente a cada máquina de inyección en paralelo. En pero la resultante del sistema es la combinación de la rapidez de producción de cada máquina. El producto del proceso se conjunta en el montacargas cuya periodicidad de arribo debe ser tal que permita el desalojo de las piezas generadas. Y, por supuesto, considerando la capacidad del montacargas por cada viaje realizado.

PARTE 3

4 LA INDUSTRIA DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS

4.1 EMPRESA "PLÁSTICOS DUROS"

Ubicada en el Valle de México, la empresa denominada "Plásticos Duros S. A." para nuestros fines, desde su consolidación hace varios años, ha venido desarrollando productos plásticos requeridos por otras empresas para ensamble de productos con piezas a base de polímeros. Plásticos Duros se fundo en 1965 como respuesta a industrias de telecomunicaciones y como respuesta a la imagen generada, en 1972 la industria abrió nuevos mercados. Incursionó en la Industria Automotriz con piezas plásticas para el motor, así mismo Plásticos Duros de ha hecho presente en industrias tales como la electrónica, farmacéutica, juguetera y de equipos del hogar tanto a nivel nacional como internacional. La misión de la empresa refleja su interés en fabricar productos de calidad que-cumplan con las normas que el cliente requiera. *"Plásticos Duros" es una empresa dedicada a la inyección de plásticos de ingeniería y a la fabricación de productos para la industria automotriz. Su propósito es trabajar a niveles de excelencia y con la mas alta tecnología para proporcionar un servicio optimo al cliente nacional y del extranjero, obteniendo utilidades justas, para beneficio nuestro, de la comunidad y del país.*

En los últimos años; apenas después de la crisis económica de 1994, la compañía a buscado nuevas oportunidades de mercado y desde el inicio ha encontrado en la industria automotriz, uno de sus mejores clientes. Junto con otros proyectos "Plásticos Duros" ha aumentado la producción de piezas para satisfacer la demanda. En meses recientes la empresa ha adquirido nuevas máquinas y herramientas. En el presente año, "Plásticos Duros", tiene el proyecto de remodelar su planta productiva incluyendo: nuevo equipo de alimentación de materia prima, transporte de cajas con producto terminado, nuevas naves de almacén y embarque, etc. El

proyecto obedece a convenios firmados entre la empresa y varias empresas de electrodomésticos y automotriz, principalmente.

"Plásticos Duros" cuenta con máquinas de inyección automatizadas, con fuerzas de cierre que van desde los 75 hasta las 1100 toneladas. El control de las máquinas lo realizan microprocesadores y la comunicación con el operador es por paneles digitales y alarmas visuales y sonoras. Así, las máquinas permiten monitoriar todos los aspectos de la producción facilitando la detección oportuna de fallas en el sistema con lo que se asegura la calidad de los productos manufacturados. Las máquinas en su totalidad son alimentadas y operadas en forma semimanual por los operadores de cada nave. Además cuenta con programas de inspección periódica de las piezas y pruebas continuas que cubren las características demandadas por el cliente. Así, la empresa tiene el importante compromiso de satisfacer los requerimientos del mercado y sostener los compromisos actuales de producción.

El área de producción cumple con la función de generar lotes de producto terminado de acuerdo al plan de producción; mantener la producción en las diferentes naves en niveles y rangos especificados por el departamento de planeación. Así mismo, procura la mejora continua de sus procesos de producción evaluando nuevos proyectos y retroalimentando a planeación con datos actuales representativos de la actividad de producción.

Area de Producción

Una de las áreas de mayor interés, debido al impacto de sus proyectos; es la nave de producción de piezas automotrices. Denominada "Nave D". En ella, se manejan moldes para partes de ensambles plásticas de dos importantes marcas. La nave D cuenta con tres máquinas de inyección de 1000, 1100 y 500 toneladas de presión; denominadas "D01", "D02" y "D03" respectivamente, como se aprecia en el plano de piso 4.1). Cada máquina produce en promedio 1.5 piezas por minuto en operación normal y trabajan durante todo el día o tres turnos de trabajo. En la semana, la empresa opera de lunes a sábado y en el área de interés cambian de molde de 0 a 2 veces en promedio por semana o dependiendo de pedidos programados y urgentes.

Respecto al movimiento de materiales, la alimentación de las máquinas de inyección de la nave D, así como en la mayoría de la empresa, se realiza en cajas de 400 kg. o sacos de 25 kg. de materia prima pigmentada en la empresa o proveniente directamente del proveedor. La materia prima llega a cada máquina en montacargas o tarimas desde el de almacén y de acuerdo al plan de producción para el área. Es costumbre que el departamento de almacén mande por lo menos del material requerido la mitad de la producción estipulada por el departamento de planeación. A su vez, el producto terminado, piezas producidas por una máquina o ensambles, es empacado en cajas de diferente capacidad. Las cajas de producto terminado permanecen en el área de producción hasta el momento que son liberadas y transportadas al almacén correspondiente. Frecuentemente cambian de lugar de 2 a 3 veces en el área antes de partir de la nave por ajuste del espacio disponible para el transporte o maniobras. El acceso al área se realiza por dos rampas señaladas en el plano 4.1) que conectan la "nave D" con otras naves y el almacén. En ellas circulan montacargas y tarimas móviles para el área o que van de paso al almacén. Los espacios sobrantes y entre máquinas son aprovechados para retener temporalmente que ha de ser utilizado o el recién producido hasta que se les da un fin adecuado.

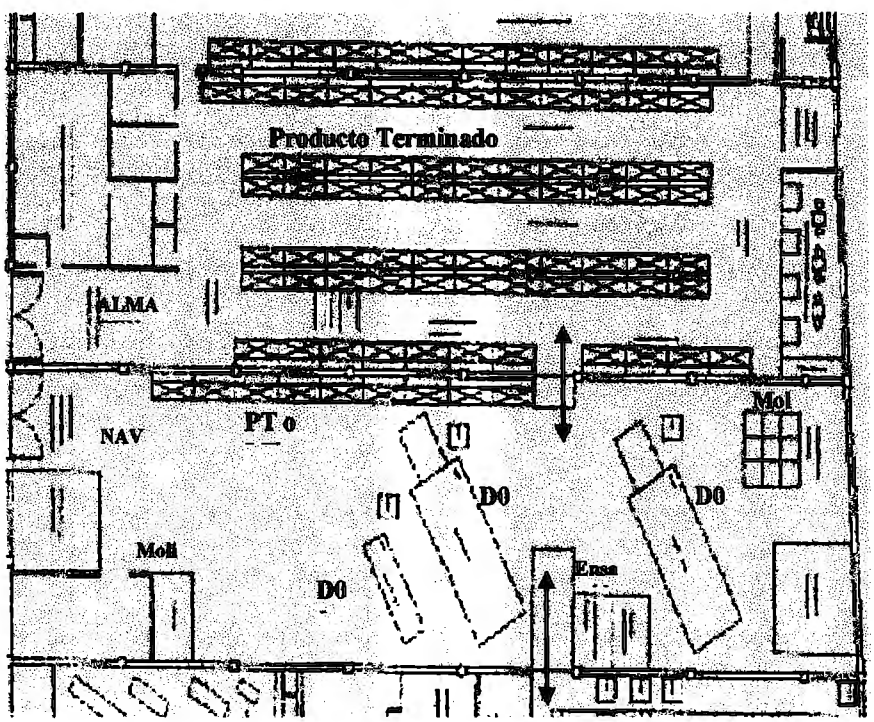


Figura 4.1) Plano de piso de la Nave D

Por la geometría y dimensiones de las piezas producidas en el área, gastos de operación y revisión del producto, las máquinas que operan en el área, al igual que algunas otras áreas, operan en el modo semimanual. En el cual la máquina completa un ciclo de trabajo y espera la señal del operador para iniciar el siguiente. El operador realiza las funciones de control del ciclo de inyección, inspección visual del producto y empaque / ensamble de las piezas. Durante el ciclo de inyección alterna actividades en la máquina asignada como:

- Sacar pieza del molde e iniciar un nuevo ciclo de inyección.
- Remover el sobrante de la pieza.
- Revisar la pieza; defectos de vista.
- Guardar y acomodar las piezas en cajas.
- Revisar alimentación de máquina.
- Acarrear la materia prima a la máquina; ocasionalmente.
- Etiquetar las piezas y las cajas.
- Anotar referencias de producción.
- Limpieza del área de trabajo.
- Procurar y armar cajas a ser llenadas con piezas producidas

El trabajo del operador es rutinario y solo puede alternar con transporte de material a, y de, almacén. Cuando ocurren cambios de color en la pieza o molde, los operadores participan activamente en tales tareas y frecuentemente ellos mismo inician la máquina o cambian algunos parámetros de esta durante la producción. Los obreros del área cambian de turno cada quince días; y en el tercer turno se procura dejar todo preparado para el trabajo sin gente responsable asignada.

Al producir piezas automotrices es frecuente que algunos moldes incluyan dos versiones de la misma pieza. Esto es, la misma pieza lado izquierdo y derecho según el diseño del molde y tamaño de la pieza. Las piezas producidas por estos moldes requieren, entonces, un par de cajas a ser llenadas y de identificación de cajas por par según el lado que contienen.

Cuando existen subensambles, las piezas que produce una máquina tienen que ensamblarse con los producidos por una segunda en los sistemas de ensamble térmico. La gente del área en

cuestión produce comúnmente algunas cajas con un subensamble, se mandan a almacén o algún lugar dentro del área hasta que la segunda máquina que produce el complemento del ensamble empieza a producir, regresan al área y juntas entran a las máquinas de ensamble; donde se combinan dos pares de piezas para formar el ensamble la misma pieza, diferente lado. Se requieren de al menos tres personas para la operación de la máquina de inyección y los ensambladores. Como de un molde salen dos piezas identificables; dos cajas por **n** número de piezas moldeadas han de llenarse y registrarse como producto terminado.

Problemática

Los proceso de fabricación de plásticos en la "nave D" es similar al sistema de producción de la mayoría de las otras áreas. Un diagrama esquemático que ayude a entender la problemática aparece en la figura 4.2), que muestra el en forma simbólica el estado de la nave un día "normal" en la empresa "Plásticos Duros". Cada máquina del área maneja ciertos moldes específicos dependiendo de la capacidad de la máquina y la frecuencia con que dichos moldes cambian. En la figura se aprecia, por un lado la cantidad de material en el área, así como el desorden en la ubicación del mismo respecto al origen o destino del producto terminado o materia prima.

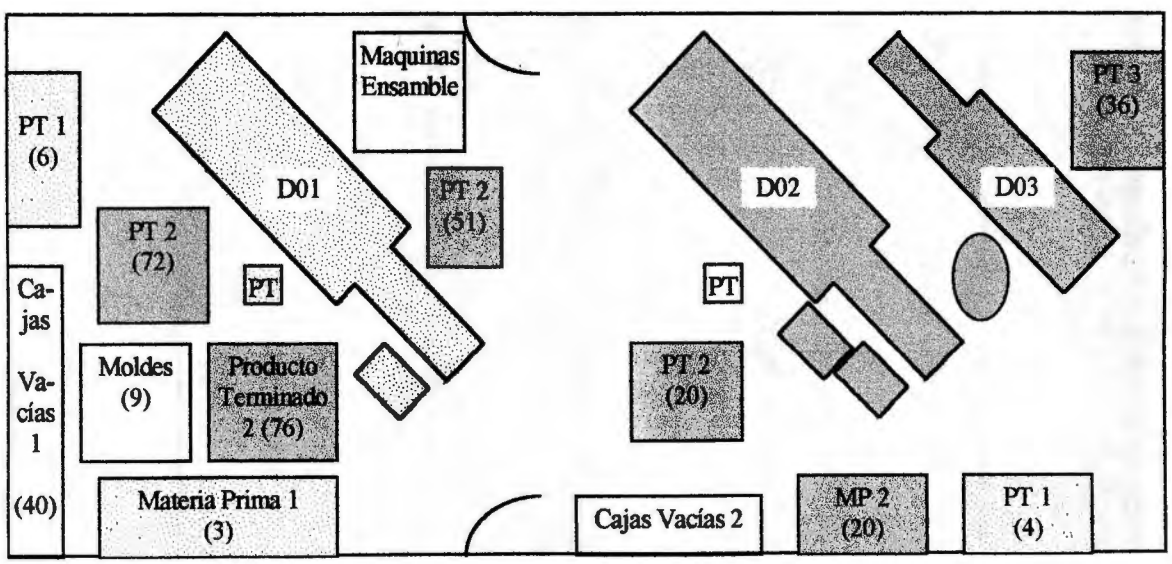


Figura 4.2) Diagrama esquemático de la "Nave D"

De acuerdo a datos manejados por la empresa (análisis de bitácora a pie de máquina) para el mes de marzo del presente año, el paro de las máquinas se debe principalmente a la falta de material y empaque, figura 4.3). Este análisis se realiza para todas las máquinas de inyección en producción. Y, para las máquinas en estudio, "nave D", la situación guarda las mismas relaciones.

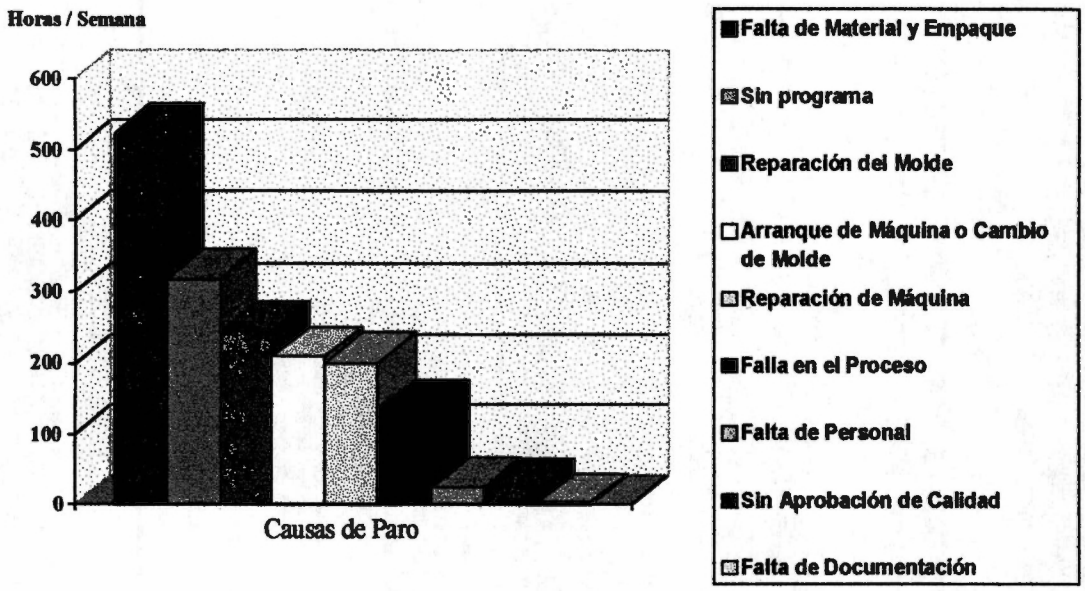


Figura 4.3) Análisis de Bitácora a Pie de Máquina, Marzo 1997

Es cierto, entonces, que el material es un factor importante que debe tomarse en cuenta para definir los gastos de la producción. Dado que cuando es provisto a planta, es en gran volumen lo que ocupa mucho espacio; y cuando escasea lo hace por largos periodos de tiempo. El costo de tener material en el área de producción es mayor que el mantener. Por un lado, la materia prima en almacén hasta que realmente se requiera; y por el otro, las piezas terminadas y empacadas en el almacén de producto terminado listas a embarcarse.

En el área de producción D las piezas requieren de gran atención, dado el uso que tienen y los índices de calidad que requieren, por parte del departamento de producción. Además el material invertido en cada pieza es mayor al empleado en las otras máquinas. Por lo que es de especial interés el manejo del material y las fallas que acarea. Con el flujo continuo de material en horas en que las tres máquinas operan, el área de trabajo se ve reducida por el volumen de cajas y sacos que esperan, ya sea ser procesados; o bien, ser transportados y acomodados en las naves de embarque. También, en algunas piezas de producción, es necesarios algún subensamble en esta

misma área; así que se requiere en primer lugar de espacio para laborar. Y, de agregar un nodo mas a la cadena de producción, lo que implica que algunos productos de subensamble elaborados en la misma nave, no pueden abandonar esta hasta haberse hecho el ensamble y empaque final.

Como punto final al plantear el problema, está el factor humano que interviene en la elaboración de piezas. El operador, responsable de la producción de cada máquina, juega un papel importante en los tiempos de producción como: ciclos de inyección, ajuste de parámetros, cambios de molde, etc. Y es el proceso manual, además de otras variables inéditas al proceso de inyección, el que da la aleatoriedad al sistema. Es decir, en buena medida, las variaciones en el proceso de producción se deben a los cambios de habilidades y experiencia entre un operador y otro. O incluso, el día y la hora son determinantes en el ritmo de producción.

4.1.1 Proceso de Inyección de Plásticos

La industria del plástico y sus innumerables aplicaciones en todos los ámbitos en que se desarrolla la sociedad actual, es resultado de las necesidades de bienes duraderos y útiles para las actividades actuales. El uso de objetos plásticos (también llamados polímeros o resinas) como pieza de ensamble o producto final ha desarrollado diversas técnicas de producción. Dependiendo de las características formación y uso, existen varios procesos de fabricación. El proceso apropiado depende la naturaleza y requerimientos del plástico, las propiedades deseadas en el producto final, el costo del proceso, su velocidad y volumen de producción. Algunos materiales pueden ser usados en varios tipos de procesos, otros requieren una máquina específica o especializada [7].

Generalmente las empresas que se dedican a producir productos a partir de los polímeros se especializan en alguna resina y enfocan su proceso de producción a tales requerimientos. De esta especialización parte la planeación de líneas de producción y requerimientos comunes de materiales mano de obra y maquinaria. Antes de profundizar en el proceso de moldeo por inyección, es conveniente caracterizar los materiales plásticos.

Materiales Plásticos

Los productos hechos de materiales plásticos pueden producirse rápidamente con tolerancias dimensionales exactas y excelentes acabados en las superficies. Con frecuencia han sustituido a los metales en los casos en que las cualidades de poco peso, resistencia a la corrosión, y resistencia dieléctrica son factores importantes a considerar. Estos materiales pueden hacerse transparentes o en colores, tienden a absorber las vibraciones y a menudo son más fáciles de fabricar que los metales. Existen diferentes clases de plásticos en producción comercial, que ofrecen hoy en ida una amplia variedad de propiedades físicas.

Comparados con los metales, los plásticos son más suaves, menos dúctiles y más susceptibles a deformaciones bajo carga, quebradizos a baja temperatura, poca estabilidad dimensional y poca resistencia al calor. Algunos plásticos son flamables y pueden deteriorarse con el sol. Afortunadamente, los plásticos tiene una buen combinación con una variedad de propiedades, sin llegar a extremos en alguna propiedad en particular.

Los materiales plásticos se pueden clasificar en términos generales como termofraguantes y termoplásticos. Los compuestos termofraguantes se forman mediante calor y presión, resultando un producto que es permanentemente duro. Sustancias químicas especiales se endurecen, mientras permanece caliente, por el proceso de polimerización y no puede ser reblandecido. Los procesos utilizados para plásticos termofraguantes, incluyen compresión o moldeo de transferencia, colado, laminado e impregnado. Asimismo, algunos son usados para estructuras rígidas o flexibles de espuma.

Los materiales termoplásticos no sufren cambios químicos en el moldeo y no se vuelven permanentemente duros con la aplicación de presión y calor. Permanecen suaves a temperaturas elevadas hasta que endurecen por enfriamiento; además, se pueden fundir varias veces por aplicaciones sucesivas de calor. Los materiales termoplásticos son procesados principalmente por inyección o moldeo soplado, extrusión, termoformado y satinado. En la tabla 4.1) se muestra compuestos termofraguantes y termoplásticos comunes.

Compuestos Termofraguantes	Compuestos termoplásticos
Fenólicos	Celulosas
Resinas Amínicas	Poliestireno
Resinas Furánicas	Poliestireno
Epóxicos	Polipropileno
Siliconas	Polisulfones
	Plásticos ABS
	Poliamidas
	Nylon
	Resinas Acrílicas
	Resinas de Vinilo
	Hule Sintético

Tabla 4.1) Principales resinas para la fabricación de plásticos

Existen varios procesos de producción para los plásticos y su empleo global es vasto. En el mundo entero el consumo de plásticos es de al menos 125 mil millones de (pounds). De este, cerca del 36% es procesado por extrusión, 32% por moldes de inyección, 10% por moldes de burbuja, 6% por calentadores y 5% usando otros métodos. Sin embargo, en número de máquinas de inyección para el proceso del plástico es tres veces mayor que la máquinas de extrusión [7].

Ciclo de Moldeo en las Máquinas de Inyección

Una máquina de inyección es el medio capaz de convertir, procesar y dar forma al material plástico en bruto en forma de polvo, pequeñas esferas (pellets) y molido en una pieza con geometría y características deseadas. El proceso de inyección consiste en calentar el plástico hasta que se funde, después forzarlo dentro de las cavidades del molde donde se enfría y solidifica. Las máquinas de inyección se caracterizan por dos componentes principales: La unidad inyector y la unidad de cierre. La unidad inyector abarca el dispositivo de aportación de material, los elementos mecánicos para la plastificación del mismo y el accionamiento del mecanismo de inyección. La unidad de cierre efectúa los movimientos de apertura y cierre del molde de inyección.

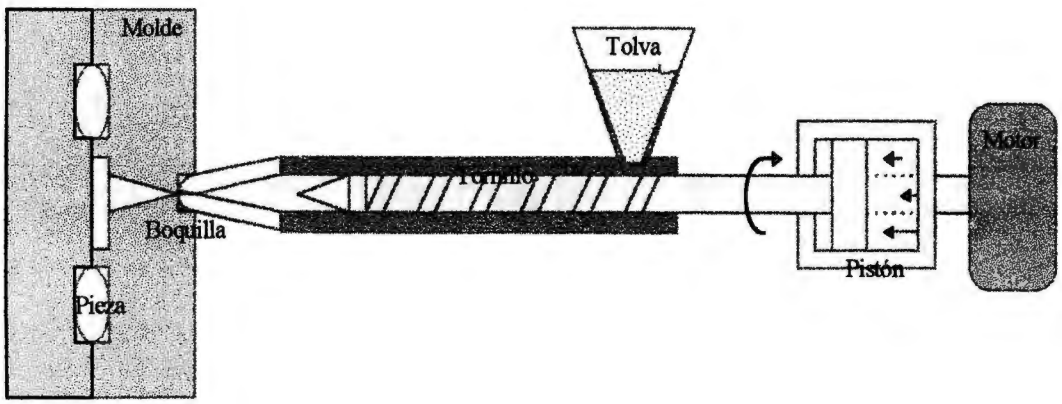


Figura 4.4) Máquina de Inyección de Tornillo Reciprocante

El proceso de moldeo por inyección (MI) es preferido por los diseñadores porque las partes de piezas de geometría compleja pueden ser controladas más exactamente y predecidas con MI que con otros procesos. Aunque su método de operación es mucho mas complejo que otros, MI requiere un completo entendimiento. Las figuras 4.4) y 4.5) muestran el perfil de carga y el ciclo de inyección donde se resalta: la manera como la colada es plastificada (ablandada) y forzada dentro del molde; el sistema de prensa para abrir y cerrar el molde bajo presión; el tipo de molde usado y los controles de la máquina [Industria].

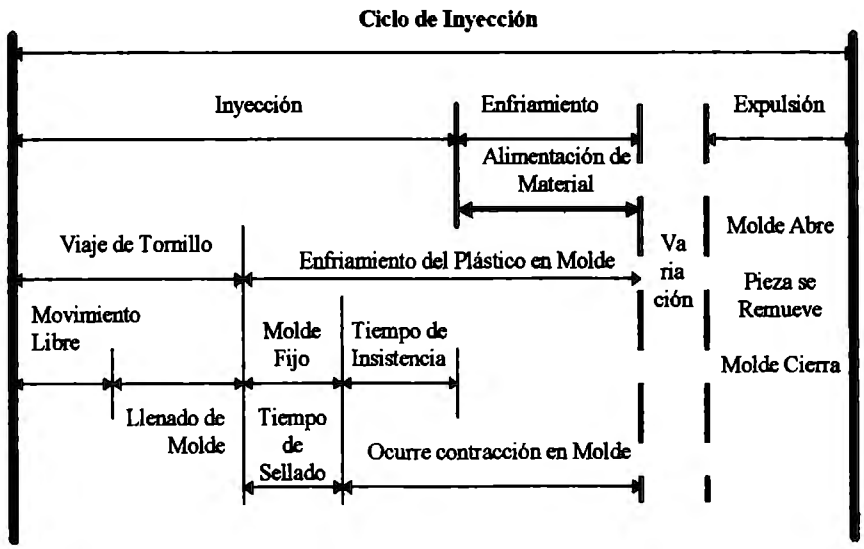


Figura 4.5) Ciclo de Inyección de Plástico del Procesado de Termoplásticos

Dentro del ciclo de inyección la variable que depende del operador de la máquina es la expulsión de la pieza, que comprende el desmolde de la pieza, el inicio del ciclo siguiente y el

tiempo de espera por otras actividades. La expulsión de la pieza comprende normalmente del 25% al 30% del ciclo, figura 4.6).

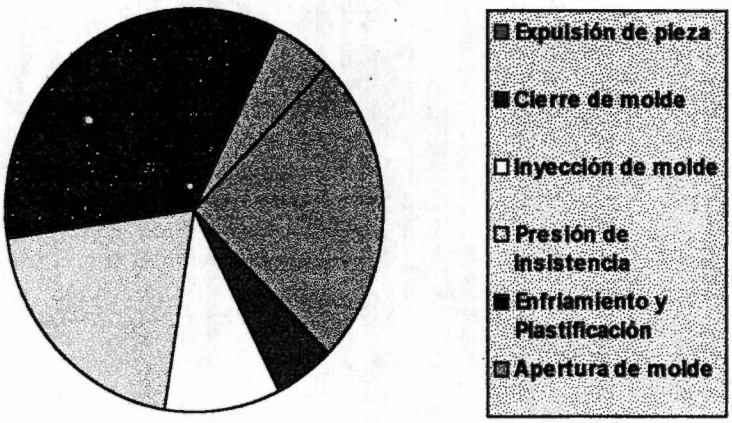


Figura 4.6) Porcentaje del tiempo de ciclo por las actividades involucradas

Variables del Ciclo de Inyección

Numerosas variables del proceso de fabricación juegan un papel importante en el desempeño de los sistemas de producción durante el proceso, incluyendo el uso de equipo auxiliar, y sus efectos en los patrones externos del sistema. Muchas de estas variables y su comportamiento son los mismos en diferentes procesos y todas están relacionadas a factores de temperatura, tiempo y presión. Es importante señalar que cualquier cambio en una operación del proceso puede acarrear ventajas y/o desventajas en otra. Una ganancia en una área puede dañar otra. Todos los procesos encajan dentro de un esquema general que requiere la interacción y control adecuado de diferentes operaciones.

La aleatoriedad que imprimen estas variables al sistema es el resultado de la combinación de variaciones producidas por cada una en mayor o menor grado. En la figura 4.7), se muestra un desglose de parámetros reconocibles y su efecto sobre el tiempo de ciclo de inyección. Los controles de tiempo, presión temperatura indican donde se encuentran los requerimientos de

desempeño de una parte moldeada. La suma del número de variables de la figura 4.7) causara cambios en la pieza si no son controladas adecuadamente [7].

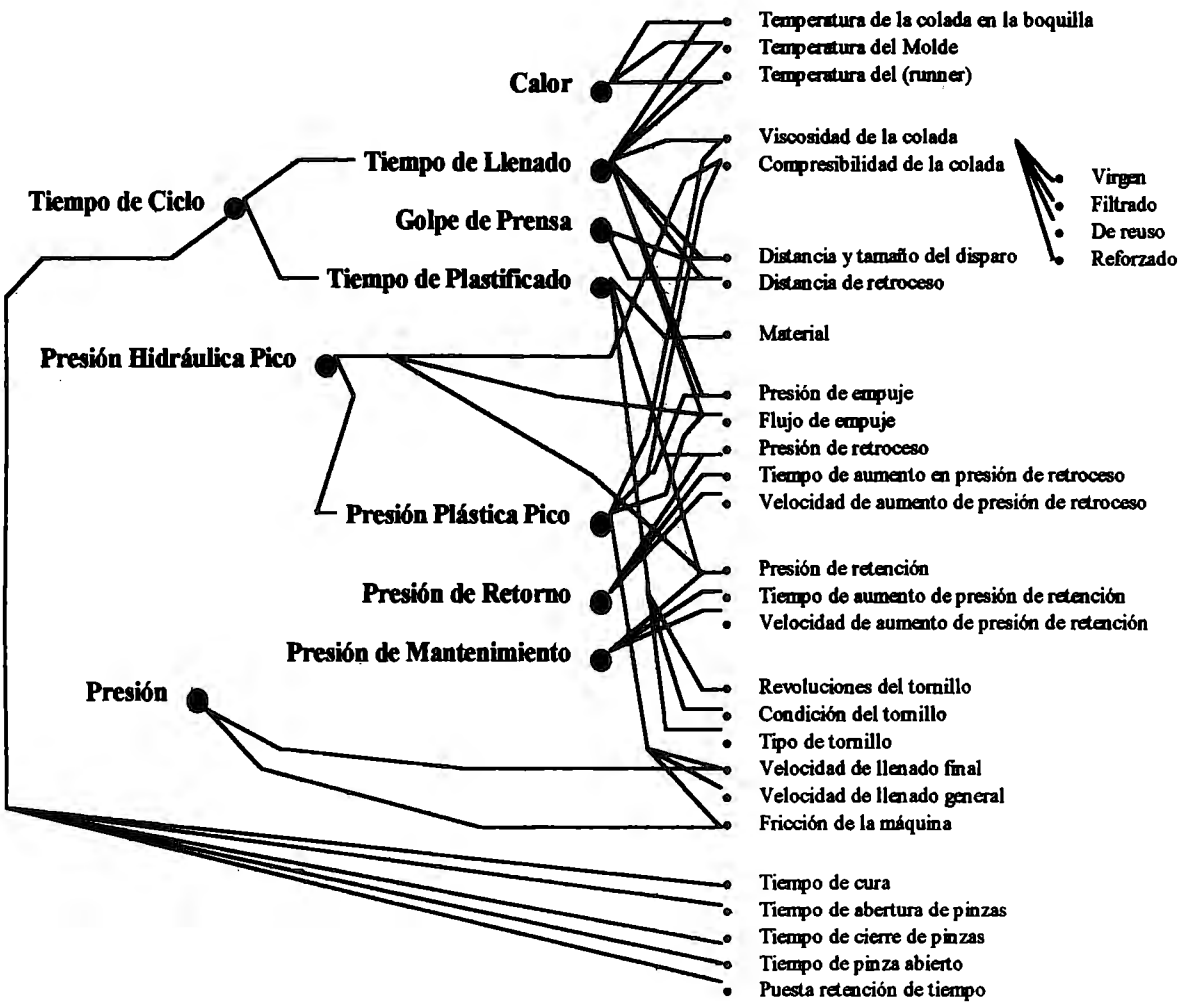


Figura 4.7) Variables que intervienen en el Tiempo de Ciclo

4.1.2 Parámetros del Sistema

En una máquina de inyección, el ciclo de inyección es el proceso principal en la producción de piezas de plástico. Sin embargo, durante la producción se presentan otros procesos dependen o regulan el ciclo de inyección. Los procesos que dependen del ciclo de inyección son:

1. Rapidez en la generación de piezas

2. Empaque de piezas en cajas
3. Volumen de inventario a un tiempo
4. Ensamble de piezas

El ciclo de producción se ve afectado por otras actividades productivas o improductivas:

1. Provisión de materia prima
2. Ajuste de máquina
3. Cambio de Molde
4. Falla en el ciclo de inyección
5. Cambio de producción (color, pieza)
6. Arreglo por falla de máquina o molde

El tiempo principal a considerar es el tiempo de ciclo para un molde dado. Es el molde utilizado el parámetro preponderante en los demás tiempos. Por ejemplo, el número de piezas por unidad de peso de la materia prima depende del peso por pieza moldeada; el tiempo de ciclo aumenta al extenderse el tiempo de inyección del plástico al molde y el tiempo de enfriamiento; la probabilidad de defectos en las piezas, en principio, depende de la geometría y puntos de inyección de la pieza, etc. Como a cada máquina se le pueden asignar varios moldes, dependiendo de las características de la máquina, los tiempo del proceso deben adecuarse en cada análisis. El proceso creado a partir del ciclo de inyección no varia ni en el número de estados ni la secuencia con que se siguen unos a otros. Es decir, el comportamiento del sistema no cambia en forma o lógica. Esto asegura que el modelo desarrollado será valido para cualquier máquina que opere en el modo descrito y con el manejo de materiales señalado.

Para el sistema de la nave D cada máquina de inyección, opera en forma independiente. El operador es responsable de la operación, alimentación y resolución de fallas menores; como son, ajuste de parámetros de la máquina, pieza atorada, falta temporal de materia prima, etc. También lleva a cabo acciones de manejo de material y pormenores del área. En pero, la producción de cada máquina se suma a las otras y se refleja en el transporte al almacén de producto de terminado. Las cajas con piezas moldeadas provenientes de cada máquina se acumulan en la nave hasta que son transportadas por montacargas o plataformas móviles.

Como no existe un control adecuado ni programación de tareas en lo que a inventario en planta se refiere. Y, como las actividades de transporte de material no están asignadas a una persona en específica, las cajas de materia prima y producto terminado, frecuentemente se acumulan en el área de producción. El apiñamiento de cajas en el área de trabajo, dificulta otras actividades y el manejo apropiado del material. Impide el desalojo de material o piezas rezagadas con la necesidad de mover algunas cajas para dar paso a otras. Por último, y considerando proyecciones futuras, el espacio que ocupan ahora estas cajas no hace posible pensar en aumentar el numero de máquinas de inyección el la zona.

Un buena distribución del espacio en planta es necesario, pero es primordial la planeación del flujo tanto de materia prima como de producto terminado. Para esto es necesario conocer a fondo el funcionamiento del sistema, los estados y tiempos que lo rigen para determinar posibles soluciones al problema. Considerar, por ejemplo, el costo de tener un montacargas exclusivo de la zona en proporción con el material transportado; o bien el empleo de personal exclusivo para transportar la piezas y proveer de materia prima, contra el salario pagado por día; etc.

En Plásticos Duros se lleva un reporte del estado de cada máquina por día, turno y hora en el se presenta cada estado. En el nave D se consideran los estados de la máquina como:

- Máquina trabajando
- Falta de material y/o empaque
- Falla de molde
- Falla de máquina
- Falta de documentación
- Falta de personal
- Máquina sin programa
- Máquina sin aprobación de Calidad y/o Ingeniería
- Cambio de molde y arranque de máquina
- Falla en el proceso
- Cambio de Color

Consideraciones a la Máquina de Moldeo

Dado que el funcionamiento de cada maquina es independiente de alguna otra en la misma nave; y solo dependiente en parte de otra cuando se realiza ensamble de piezas. El caso 1, máquina de inyección con operación semimanual, se toma como la base del sistema de producción en una

nave cualquiera. Los tiempos de arribo de materia prima y producción de piezas depende en gran medida, como se observó anteriormente, del molde usado y el volumen de materia prima inyectada por piezas.

Del sistema básico de una máquina de inyección, el estudio las variables preponderantes que influyen en el problema de acumulación de material y cuyo comportamiento es decisivo en la producción son:

1. Arribo de materia prima; programada por planeación o por requerimiento de producción.
2. Moldeo de piezas; con tiempo determinado por volumen de pieza y el operador.
3. Paro en la producción; por falla en la máquina o molde.
4. Tiempo de reparación; incluyendo ajuste de parámetros y generación de alguna pieza de prueba.

Acciones como empaque de piezas en caja o etiquetado de cajas se incluyen indirectamente en el tiempo de producción de piezas. Otras como cambio de molde o cambio de color de la pieza quedan fuera de consideración al ser actividades poco frecuentes o que cambiarían las condiciones para la simulación planteada.

En el caso en que ocurra un paro de la máquina por un tiempo mayor a 15 minutos. Se considera una falla mayor u otra actividad que al iniciarse la producción se toma como un arranque en el proceso. Primero, porque las condiciones de temperatura y plasticidad del material cambian cuando la máquina sale un ritmo de producción. Segundo, porque el producto terminado continua siendo recolectado y llevado fuera del área.

5 ESTUDIO DEL SISTEMA

5.1 MANEJO DE DATOS

El algoritmo presentado en el Capitulo 3 proporciona resultados que describen el comportamiento de máquinas en paralelo con colector de piezas común. Para el estudio de la recolección de datos se parte del echo de manejar al sistema de inyección de plástico como una línea de espera aislada de otras líneas (otras máquinas de inyección circundantes). La selección de los parámetros específicos para analizar la línea de espera por simulación está determinado principalmente por las distribuciones de tiempos de arribo y servicio de las transacciones dentro del sistema. En la práctica, la determinación de estas distribuciones implica observar las líneas de espera durante su operación y registrar los datos pertinentes. De lo anterior surgen dos preguntas respecto a la recolección de los datos necesarios:

1. ¿Cuándo observar el sistema?
2. ¿Cómo registrar los datos?

En la mayoría de las líneas de espera se tiene lo que se llama periodos ocupados, durante los cuales la tasas de llegadas al sistema crece en comparación con la de otros periodos. La recolección de datos relativos a llegadas y salidas se puede efectuar utilizando una de dos maneras:

1. Medir el tiempo entre llegadas (o salidas) sucesivas para determinar los tiempos entre arribos (o servicio).
2. Contar el número de llegadas (o salidas) durante una unidad de tiempo seleccionada.

El primer método se diseña para que proporcione las distribuciones de los tiempos entre arribos, o servicios, y el segundo método para que dé las distribuciones del número de llegadas, o salidas. En la mayoría de los modelos analíticos de líneas de espera podemos describir los procesos de entrada y salida, ya sea por el número de eventos o bien, por el tiempo entre eventos (entre arribos, o tiempos de servicio).

En el proceso de inyección dado su aleatoriedad y sucesión de eventos a tiempos desiguales se optó por tomar los eventos al tiempo en que sucedían. Un cronómetro y hojas de registros, mostrada en la figura 5.1) fueron la base para la toma de tiempos por ocurrencia del principio y el fin de un evento. En esta hoja aparece la máquina de la que se ocupa la medición y el molde montado. El cronómetro se inicia a una hora dentro del turno de trabajo y se registra el momento de ocurrencia de los eventos de interés para su ingreso al sistema.

Maquina		Pieza						Fecha		
Hora Inicio		Código								
ACTIVIDAD	**Inicio**	**Fin / #**	**Inicio**	**Fin / #**	**Inicio**	**Fin / #**	**Inicio**	**Fin / #**	**Inicio**	
Llegada de M.P.										
Partida de P.T.										
Llegada de C. Vacías										
Cambio de Molde										
Llenado de P.T. A										
Llenado de P.T. B										
Ensamble										
Paro de Maquina (Falla):										
Ciclo de Inyección										
Estado	Hora									
				C. Materia Pr.						
				C. Prod. Term						

Figura 5.1) Hoja de Recolección de Datos.

Con los datos recolectados es posible obtener los gráficos correspondientes al comportamiento del sistema real. Pero de mayor importancia a los anteriores son los estadísticos que describen en forma numérica los eventos que intervienen en el proceso de inyección.

Existen diferentes moldes que pueden ser asignados para producción a cada máquina de acuerdo al Plan de Producción para una semana determinada. Cada molde tiene tiempos propios para la formación de una pieza y algunos cuentan con dos cavidades para producir dos piezas por ciclo de inyección.

De los moldes para el área de interés se toman como ejemplo para el análisis del comportamiento de la máquina aquellos de mayor uso en producción. A partir de los datos conjuntos registrados por el departamento de producción y los propios. Se obtienen los valores y las distribuciones de los arribos y servicios para cada máquina. También se incluyen los datos de las fallas menores como una sola distribución y los tiempos de reparación. Todo esto con algunas restricciones descritas a continuación.

5.1.1 Ajuste de Curvas y Consideraciones

Consideraciones

Dado que el funcionamiento de cada máquina es independiente de alguna otra en la misma nave; la máquina de inyección con operación semimanual se toma como la base del sistema de producción en una nave. Los tiempos de arribo de materia prima y producción de piezas depende en gran medida, como se observó anteriormente, del molde usado y el volumen de materia prima inyectada por piezas.

Las variables preponderantes que influyen en el problema de acumulación de material y cuyo comportamiento es decisivo en la producción son:

1. Arribo de materia prima; programada por planeación o por requerimiento de producción.
2. Moldeo de piezas; con tiempo determinado por volumen de pieza y el operador.

3. Paro en la producción; por falla en la máquina o molde.
4. Tiempo de reparación; incluyendo ajuste de parámetros y generación de alguna pieza de prueba.
5. Recolección de producto terminado; variable final que se desea optimizar para evitar la acumulación de materia en planta.

Acciones como empaque de piezas en caja o etiquetado de cajas se incluyen indirectamente en el tiempo de producción de piezas. Otras como cambio de molde o cambio de color de la pieza quedan fuera de consideración al ser actividades poco frecuentes o que cambiarían las condiciones para la simulación planteada.

En el caso en que ocurra un paro de la máquina por un tiempo mayor a 15 minutos. Se considera una falla mayor u otra actividad que al iniciarse la producción se toma como un arranque en el proceso. Primero, porque las condiciones de temperatura y plasticidad del material cambian cuando la máquina sale un ritmo de producción. Segundo, porque el producto terminado continua siendo recolectado y llevado fuera del área.

Ajuste de Curvas

La figura 5.2) muestra una secuencia de ciclos de inyección de las máquinas del área "D" con los moldes nombrados D01, D02 y D03. Se puede observar que el tiempo de producción es poco variante con algún retraso eventual. De estos datos se obtiene la distribución correspondiente y los parámetros representativos. A partir de los datos a Pie de Máquina se generan los valores para los servidores dispuestos en la tabla 5.1).

Parámetros	Máquina 1	Máquina 2	Máquina 3
Media (seg.)	65.78	71.92	55.20
Desviación Estándar	0.112	0.225	0.87

Tabla 5.1) Parámetros de Máquinas Area "D" Sistema Real

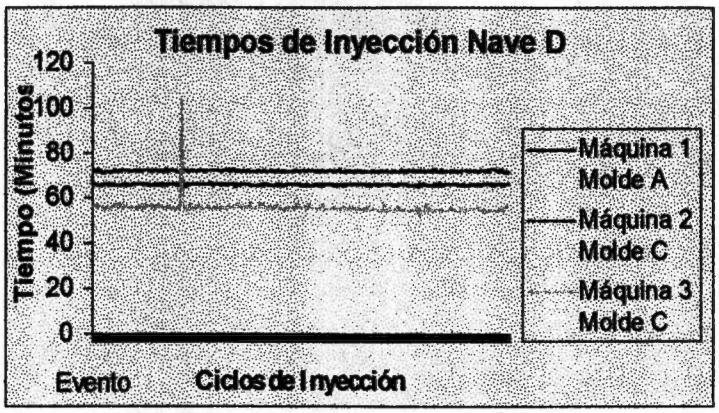


Figura 5.2) Tiempos de Inyección Nave "D".

Un primer acercamiento al funcionamiento del Modelo se observa con la comparación entre la distribución del sistema real y el simulado con base en datos reales para una máquina de inyección. En las figuras 5.3) y 5.4) se aprecian la distribución para cada caso citado.

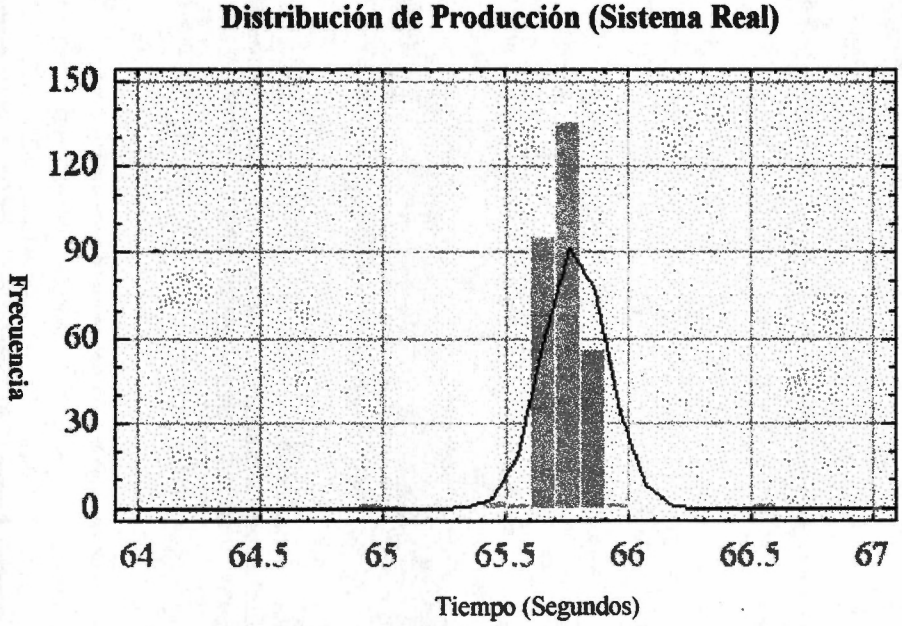


Figura 5.3) Distribución de Producción para Máquina 1 Sistema Real.

Retomando las consideraciones anteriores, en toda máquina de inyección el tiempo principal a considerar es el tiempo de ciclo para un molde dado. Es el molde utilizado el parámetro preponderante en los demás tiempos. Por ejemplo, el número de piezas por unidad de peso de la materia prima depende del peso por pieza moldeada; el tiempo de ciclo aumenta al extenderse el tiempo de inyección del plástico al molde y el tiempo de enfriamiento; la probabilidad de defectos

en las piezas, en principio, depende de la geometría y puntos de inyección de la pieza, etc. Como a cada máquina se le pueden asignar varios moldes, dependiendo de las características de la máquina, los tiempo del proceso deben adecuarse en cada análisis. En la figura 5.4) se muestra la simulación para la Máquina 1 con el Molde A. Al igual que en la figura, se pueden recrear los gráficos para otros moldes operando en diferente máquina.

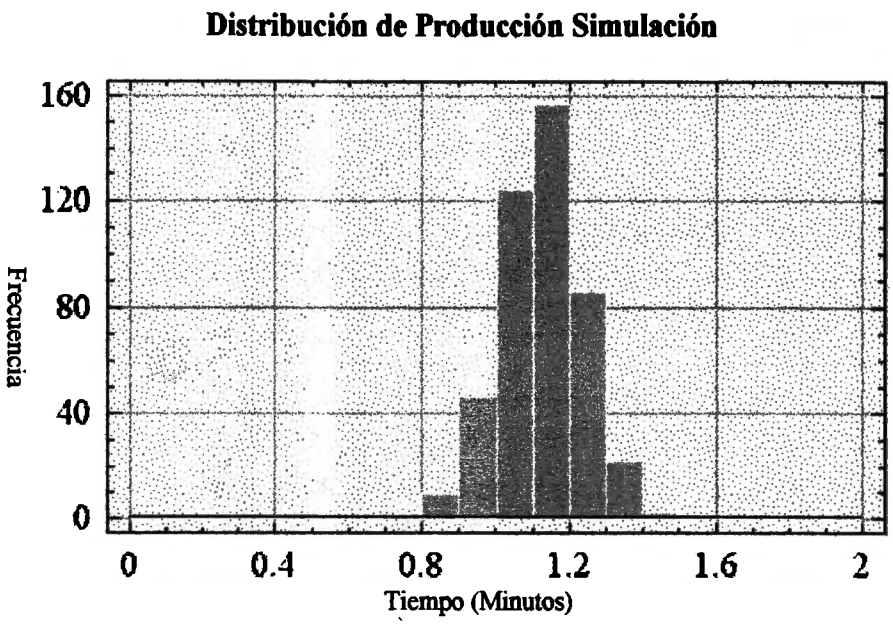


Figura 5.4) Distribución de Producción para Máquina 1 Simulación.

El proceso creado a partir del ciclo de inyección no varia ni en el numero de estados ni la secuencia con que se siguen unos a otros. Es decir, el comportamiento del sistema no cambia en forma o lógica. Esto asegura que el modelo desarrollado será valido para cualquier máquina que opere en el modo descrito y con el manejo de materiales señalado. Así, igualando en lo posible las condiciones del sistema Real. Con el algoritmo de simulación se obtiene la tabla 5.2).

Parámetros	Máquina 1	Máquina 2	Máquina 3
Media (min)	1.1195	1.2492	1.0314
Desviación Estándar	0.3847	0.5113	0.916

Tabla 5.2)Parámetros de Máquinas Area "D" Simulación

5.2 APLICACION EL ALGORITMO DE SIMULACION

El algoritmo de simulación por eventos se implemento en el Lenguaje de programación Visual Basic por su facilidad de interfaz con el usuario y actualización. El programa sigue fielmente el algoritmo desarrollado con tres servidores y un recolector; siendo los eventos:

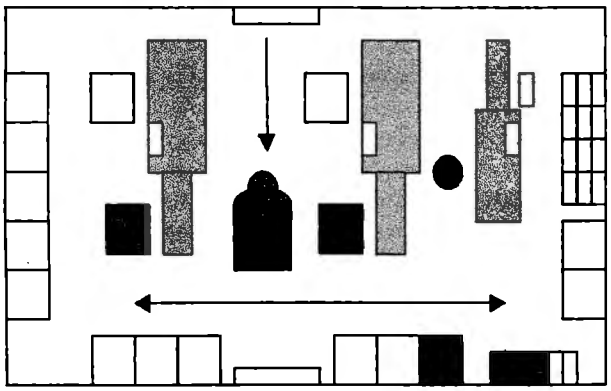
- Arribo de Materia Prima al Línea de Espera $i = 1,2,3$
- Salida de Producto por cada Servidor
- Falla Menor en algún Servidor
- Reparación de Servidor
- Función Generadora del Tiempo Programado para siguiente evento
- Función de Tiempo Siguiente
- Evento Inicial
- Recolector de Datos

Como se menciona en la descripción del Algoritmo, este busca el evento programado próximo y avanza el reloj de la simulación hasta este punto. Ejecuta el evento correspondiente y vuelve a programar el evento en tiempo.

Con el fin de esclarecer y visualizar de manera gráfica los acontecimientos; en la figura 5.5) se muestra el gráfico en algunos tiempos de una simulación. Al Principio las máquinas se alistan y preparan para producir. Los arribos programados acontecen y la materia prima alimenta las máquinas de inyección; el sobrante se deposita en los lugares marcados. Se cumple así el arribo, figura 5.5a).

Posteriormente el sistema ya procesando, genera piezas que son empleadas y colocadas en los lugares dispuestos a tal fin; en espera de ser transportados a almacén de embarque por el montacargas. El material circula en el área de producción. Las cajas de producto terminado, de diferente tamaño, ocupan los lugares marcados, figura 5.5b)

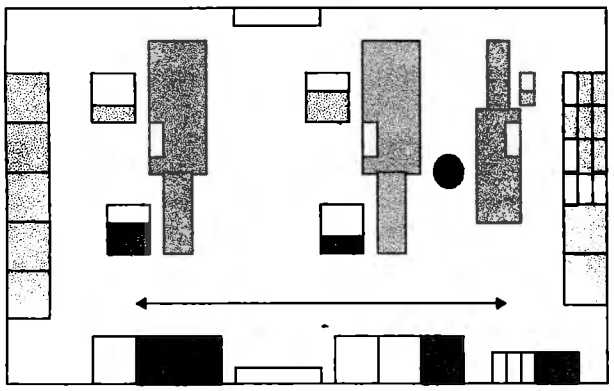
Ocasionalmente una máquina falla y deja de producir. En la figura 5.5c), coincide esta falla con el momento de recolección de piezas. Durante la recolección se vacía en la capacidad del recurso de transporte el producto terminado.



a) Llegada de Material

Inicio de Producción

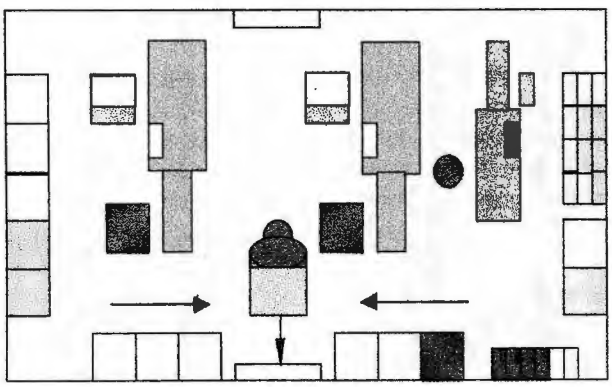
- Máquinas ajustadas listas a producir
- Cajas vacías de producto terminado armadas
- Espacio disponible en planta a ser ocupado
- Alimentación de materia prima a máquinas
- Arribo de materia prima



b) Area en Producción

Manejo de Material

- Máquinas produciendo piezas
- Llenado de cajas de producto terminado
- Espacio disponible, se ocupa con producto terminado
- Disminuye materia prima en máquinas
- Programación de recolección de cajas



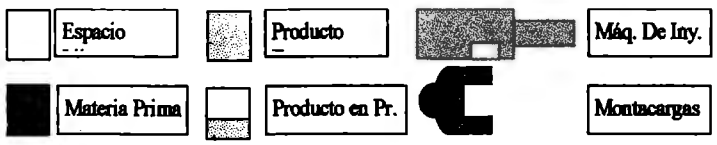
c) Recolección de la Producción

Falla de Máquina

- Montacargas recogiendo cajas con producto
- Llenado de cajas de producto terminado
- Espacio disponible, se desocupa de producto terminado
- Disminuye materia prima en máquinas
- Falla de Máquina, paro de su producción

Figura 5.5) Proceso de Producción de Piezas Plásticas.

Donde:



Para implantar el algoritmo al sistema de tres servidores en paralelo utilizamos los valores para cada máquina, registrados en la recopilación de datos. Además se proponen tiempos de recolección a fin de establecer un balance entre la permanencia de la visita del recolector y la rapidez con la que se acumulan las cajas. Después de varias replicas y revisión de resultados se proponen para el servidor de recolección los valores :

Media	Des. Estándar	Cajas D01	Cajas D02	Cajas D03
60	5.00	4	2	8

La cantidad de cajas colectadas es la misma para cada servidor, pero se tiene la posibilidad de variar dichos valores del archivo de entrada al programa. También se supone una secuencia de asistencia a los servidores. En este caso visita primero al servidor D01, D02 y por último la D03. Para cada máquina la situación tiene un aspecto similar a la figura 5.6). En esta figura se observan los movimientos que el operador de la máquina debe realizar; así como el flujo de material.

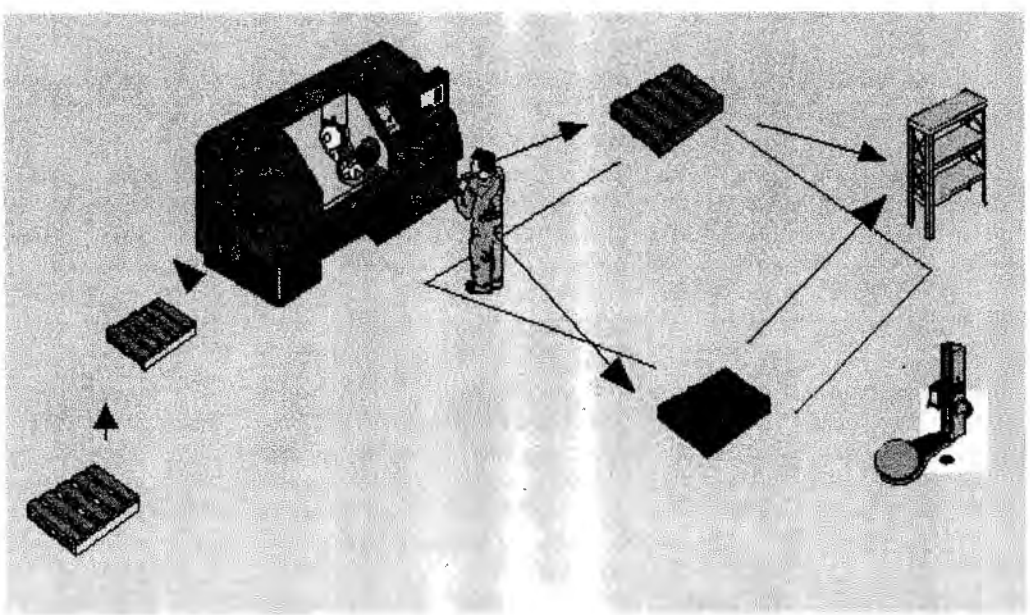


Figura 5.6) Representación del área de trabajo para un operador.

6 ANALISIS DE RESULTADOS

Un archivo de entrada tiene el completo de los parámetros de entrada al programa. En el cual se establecen las características que el molde imprime en el sistema de Líneas de Espera. La tabla 6.1) muestra el contenido del archivo y las posibilidades de realizar cualquier cambio en el comportamiento del sistema.

D01	Media	Des. Est.	Cantidad
Arribo	420	0	500
Servicio	1.1248	0.112	2
Falla	400	0	1
Compostura	5	0.1	1

D02	Media	Des. Est.	Cantidad
Arribo	420	0	500
Servicio	1.2492	0.255	2
Falla	400	0	1
Compostura	5	0.1	1

D03	Media	Des. Est.	Cantidad
Arribo	120	0	200
Servicio	1.0092	0.867	2
Falla	400	0	1
Compostura	5	0.1	1

Tabla 6.1) Parámetros de Variables de Entrada.

Factores importantes para garantizar que los datos de la simulación son confiables y no tienen alguna tendencia son el número de iteraciones de la simulación y la cantidad de replicas.

Para el número iteraciones en una simulación se debe observar que los datos de salida en una corrida del programa tomen alguna distribución propia que no precisamente debe ser alguna conocida. Para las gráficas 6.1a) y 6.1b) se consideraron para cada simulación 1000 iteraciones, equivalentes a un día de trabajo. Tiempo suficiente para estabilizar al sistema. Permanentes las condiciones de operación se puede observar que cada variable adquiere su propia distribución, más son de interés la comparación de las respuestas cuando se cambia los parámetros del recolector de material.

Otro aspecto involucrado en la descripción de variables, es el número de replicas propuestas. El valor propuesto para asegurar resultados correctos es 30 [6]. Precisamente se observa en la gráfica 6.1) que la mayoría de los valores se agrupan con cierta distribución y algún valor medio. En tiempo, las replicas para cada simulación deben dar valores independientes dado la infinidad de rutas muestra que el sistema puede recorrer.

En la gráfica 6.1) se presentan las distribuciones para las variables de salida:

1. T_Prod.- Producción de Cajas para Máquina I
2. Recolector.- Porcentaje de Utilización del Montacargas con variación en su media

Se probaron valores para los parámetros del montacargas retomando el siguiente valor de acuerdo al comportamiento del modelo. Para cada uno de estos valores se utilizaron los mismos criterios de iteraciones y replicas. A este criterio de uso del recurso de transporte se denomina "Política 1". Se presentan algunos valores manejados para la simulación; en minutos.

- $\mu = 120 \quad \sigma = 5$.- Valor alto de recolección, se expresa como un valor alto en Número de Cajas de Producto Terminado, figura 6.1a)
- $\mu = 100 \quad \sigma = 5$.- Valor medio de recolección, ocasionalmente aumenta la producción de Piezas Plásticas
- $\mu = 60 \quad \sigma = 5$.- Valor aceptable para la recolección, el volumen total de Piezas Producidas rebasa en poco el manejado por el sistema real, figura 6.1b)

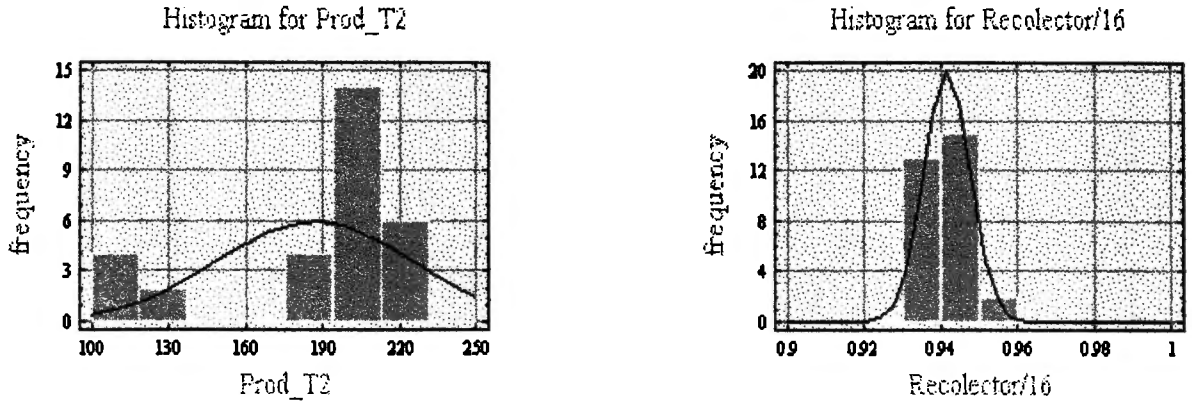


Figura 6.1a) Distribuciones de 30 replicas para: Producción y Recolecta con $\mu = 120$ $\sigma = 5$

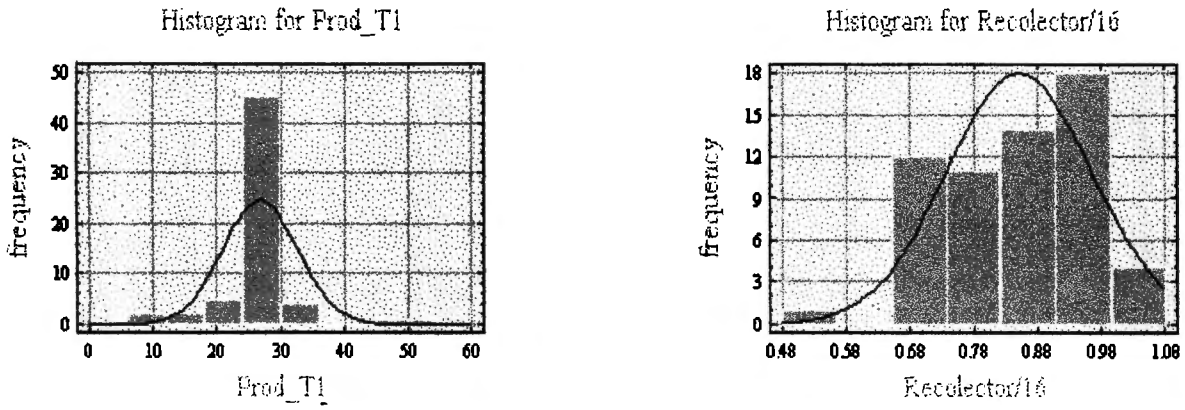


Figura 6.1b) Distribuciones de 30 replicas para: Producción y Recolecta con $\mu = 60$ $\sigma = 5$

Los datos base para la generación de la gráfica 6.1) se registran en la tabla 6.2), con diferentes valores propuestos de los parámetros del recolector ($\overline{X}Rc$).

	μ	120 min.	μ	100 min.	μ	60 min.
D01	μ	σ	μ	σ	μ	σ
Arribo	1.20413	0.78168	1.2445	1.0229	0.844073	0.5537
Colecta	0.99756	0.0007	0.9837	0.03286	0.98087	0.03497
Falla	0.0109	0.00843	0.0055	0.0031	0.009329	0.01311
Servicio	0.70836	0.1317	0.8752	0.1166	0.70836	0.14977

Tabla 6.2) Parámetros de Variables de Entrada con Diferente Media

6.1 Comparación de Resultados

Las gráficas resultantes muestran el histograma de frecuencias de las funciones de salida del sistema en el cual se observa en primera instancia el arribo al sistema. El promedio de cajas en el sistema es menor a una caja. También respecto disminuye el numero de cajas de producto terminado respecto al mencionado en el Capitulo 4. El resumen de las medidas descriptivas de la gráfica 6.1) se muestran en la tabla 6.3). Al igual que en la figura solo se presentan los valores para la máquina 1 con molde A. En esta tabla se presenta una comparación entre los resultados de simulación para las tres máquinas operando en forma independiente.

D01	Producción	Recolector 120
Cantidad	30	30
Promedio	186.866	0.94168
Desviación E.	37.6333	0.00597
Mínimo	107.483	0.93029
Máximo	228.525	1.000

D01	Producción	Recolector 120
Cantidad	30	30
Promedio	26.7939	0.851312
Desviación E.	5.8078	0.11419
Mínimo	9.4255	0.511391
Máximo	50.919	1.000

Tabla 6.3) Comparación del Algoritmo de Simulación para valores medios de recolección: 120 y 60 minutos

Otras gráficas se presentan en el Apéndice B donde se gráfica en tiempo la respuesta de las máquinas con una simulación de 500 minutos.

Por otro lado, es posible manejar dos criterios de funcionamiento para el recolector compartido por las máquinas. En el manejo del montacargas se maneja bajo dos políticas:

1. Recolección de piezas en tiempo determinado. El montacargas recoge las piezas a un tiempo establecido con una variación aceptable.
2. Recolección de Piezas cuando se cumple el máximo permitido. Considerando la disponibilidad del recolector después de un minuto de su solicitud el recuso de transporte recoge el producto terminado en su mayor capacidad.

La figura 6.2) da cuenta de ambas políticas. El porcentaje de utilización se marca como la unidad.

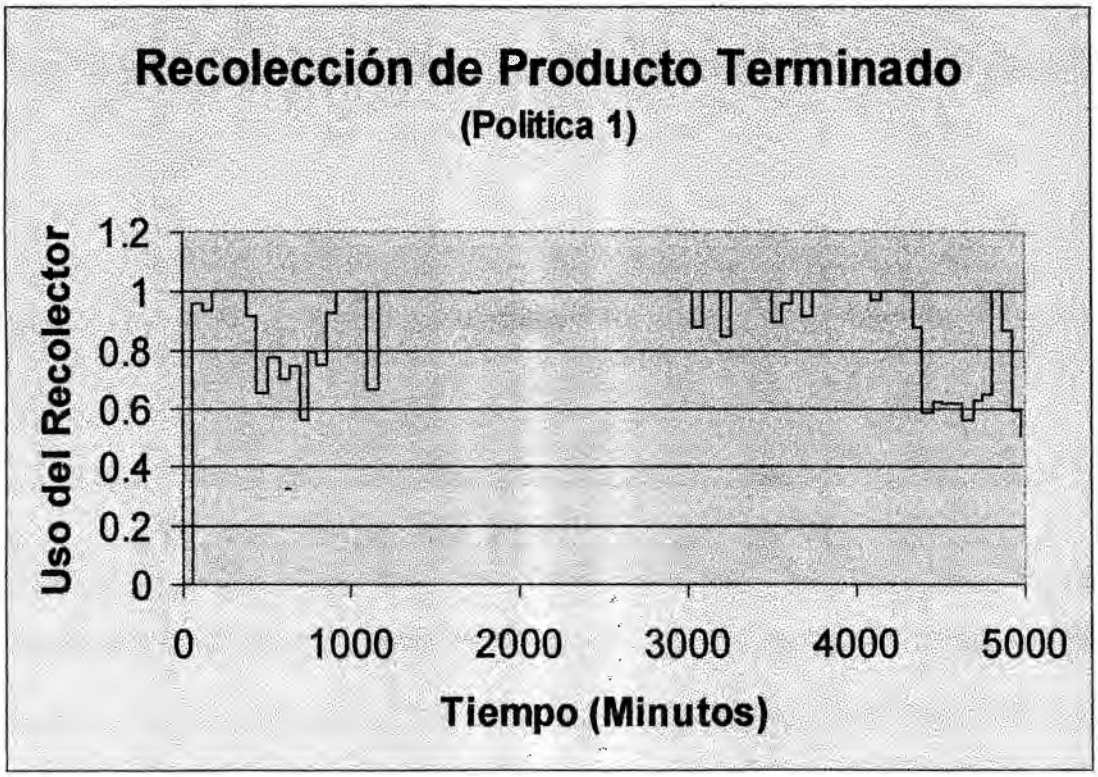


Figura 6.2 a) Porcentaje de Utilización del Montacargas con Política 1

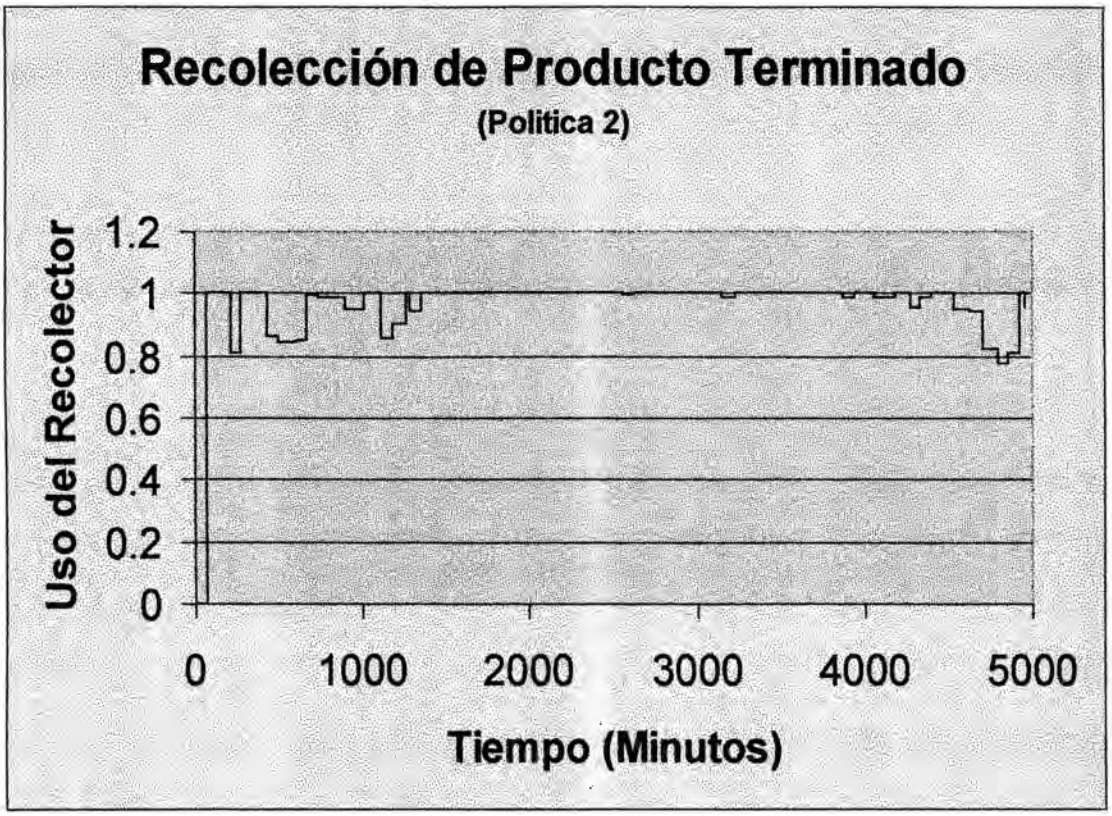


Figura 6.2b) Porcentaje de Utilización del Montacargas con Política 2

Las políticas de funcionamiento pueden ser implementadas en el sistema y de hecho hacer alguna combinación de ambas para asegurar el correcto desempeño del sistema. A partir de la gráfica 6.2 se concibe el uso del montacargas como unidad de sincronización de la producción.

PARTE 4

7 CONCLUSIONES

7.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los sistemas de manufactura consisten en máquinas y estaciones de trabajo donde las actividades de una influyen en mayor en menor grado en el desempeño global de la facilidad. Es por esto que en sistemas con variaciones impredecibles en su comportamiento es recomendable proveerse de herramientas estadísticas o en este caso de modelado para vislumbrar tendencias y en general el comportamiento del sistema. La simulación por algoritmos provee una buena herramienta para representar (en abstracto) el funcionamiento del proceso. Este tiene la ventaja de reajustarse a nuevos eventos y condiciones de operación. Se puede fácilmente modificar los valores de entrada y visualizar el efecto que se tiene en las variables de salida. De los resultados obtenidos en el Capitulo 6 se establecen algunas conclusiones y recomendaciones al sistema real.

Antes de concluir se hace referencia al Apéndice A; que presenta el programa en su versión para Visual Basic, con los procedimientos de generación de las variables aleatorias y de los eventos para los sucesos ya mencionados. En el código se aprecia la poca variación del algoritmo en esencia y su código. Además, el Apéndice B contiene algunas gráficas en tiempo de algunas pruebas del programa donde se aprecian los eventos de maneja conjunta.

Conclusiones

Como se ha establecido en la metodología del trabajo, el fin último de la simulación la establece el usuario y de las decisiones que se pretenda tomar de los resultados. Por lo que el detalle y consideraciones que deben hacerse al sistema real son vitales para el desarrollo del

modelo. Con esta base algunos puntos concretizados de los resultados de la investigación se presentan de la siguiente manera:

Del Desarrollo de Algoritmos:

- Los algoritmos de simulación son herramientas que ayudan a visualizar de manera más precisa el comportamiento de sistemas que varían de manera azarosa,. La fuerza de los resultados arrojados se refleja en la toma de decisiones y depende del fin del usuario.
- El Algoritmo de Eventos presentado cumple con las expectativas que de el se espera. Reproduciendo el funcionamiento, bajo las consideraciones tomadas, del proceso, el algoritmo acepta los parámetros para entregar las variaciones que en el sistema real se suscitan.
- Dado la aleatoriedad en la generación de rutas muestra los resultados nunca serán iguales . Sin embargo, las variaciones caen dentro de un margen de dispersión semejante a la problemática real en el aspecto exclusivo del área de producción analizada.
- La versatilidad del algoritmo para su modo de operación y cambio de parámetros de entrada, apoya la proyección del modelo para responder a diferentes propuestas de operación. Con esto se establece el hecho que la simulación se adelanta a los hechos ya que se pueden prever situaciones que puedan saturar al sistema en el aspecto de inventario.
- Los resultados globales de las variables de salida clarifican los promedios de uso e inventario importantes para los estadísticos del modelo. Estos resultados con base para la comparación entre sistemas.
- Los algoritmos por eventos tienen la facilidad de poder crecer de manera casi indefinida pero cuentan con la dificultad de actuar correctamente con eventos complejos que tengan involucrados el manejo y pensar humano.
- En simulación de procesos estocasticos es imprescindible un buen algoritmo de generación de variables aleatorias y la generación de la distribución de las variables de entrada.

Del Problema de Inyección de Plástico en el Area de Producción:

- Un aspecto importante de la toma de decisiones para una solución optima es considerar aquellos aspectos no involucrados directamente en el sistema. Como son:
  - Planeación del la Producción por otros departamentos
  - Disposición de Materia Prima en Almacén
  - Disponibilidad del Recurso de Transporte de Material en un momento determinado
  - Paro de la Producción por Falla Grave de la Máquina u otros pormenores
- El proceso de inyección para el área de estudio puede ampliarse a otras áreas que operen de manera similar. El número de máquinas operando en paralelo es no afecta a la simulación, pero el volumen total de producción debe ser calculado dado la capacidad del montacargas.
- Respecto a las políticas de recolección de piezas se observa poca variación cuando el tiempo entre transportes se adecua respecto con resultados de simulaciones previas.
- La política de tiempo programado cumple con el inventario previsto en el área y la utilización correctas del recuso de transporte. Pero además con esta política es posible sincronizar las actividades de toda la planta en compartir el montacargas entre áreas de trabajo.
- Es prudente considerar como buena opción la política de inventario máximo dado que utiliza el recurso del montacargas cuando es necesario y también lo emplea en su totalidad. El problema sobresale en el momento en que el transporte no esta disponible en el momento de la solicitud. Esta política es poco factible de ser implementada en la planta completa; dado el inconveniente de la disponibilidad del recuso.
- El molde juega un papel muy importante a ser tomado en consideración. Como el tiempo de inyección depende también del volumen plástico, el producto terminado por cantidad de piezas varia de máquina en máquina. Por lo que se establece como parámetro en el modelo el molde el tiempo de inyección y el número de piezas producidas en cada evento.
- Por último, se establece una dependencia entre el volumen del empaque con producto terminado y la capacidad total del montacargas.
- Algunas otras variantes a considerar son: Distribución de Moldes, Capacidad / cambios de molde, Costo primo más bajo, Gastos de Energía, Velocidad de producción / Eficiencia.

Recomendaciones

Para el sistema de inyección de plásticos se propone algunos cambios de los más mediatos hasta los sistemas de manufactura con nuevos sistemas de transporte y estaciones de trabajo:

- Recoger las piezas defectuosas y tener un seguimiento para su retiro del área de trabajo.
- Ajustar el tiempo de recolección en alguna de las dos políticas consideradas.
- Designar áreas especificas para la materia prima y producto terminado en cada máquina tomando en cuenta el movimiento del montacargas. También evaluar los movimientos que realizan los operadores a fin de facilitar su labor en el movimiento de cajas.
- Establecer la estación de rebabeo en área separada del transito de material.
- Proyectar un montaje especializado para producción y otro para el almacén
- Resolver el problema de información entre los departamentos en el manejo de ordenes de producción. Que involucra contar con el material al tiempo solicitado.
- Establecer una red aprovisionamiento de materia prima directamente a las máquinas.
- Reconsiderar la distribución de las máquinas para aceptar transportadores continuos a lo largo de un área y entre áreas.

7.2 DISCUSION DEL SISTEMA

Los sistemas de manufactura consisten en maquinas y estaciones de trabajo donde las operaciones como, maquinado, formado, ensamble, inspección y prueba son realizadas en; operaciones, subensambles y ensambles para crear productos que puedan ser útiles a los clientes. El enfoque donde se aplica el presente trabajo es en sistemas de manufactura de **partes discretas**, donde cada proceso de operación es distinguible. Podemos clasificar los sistemas de manufactura de acuerdo a varios criterios. De manera generalizada se han los sistemas de manufactura se distinguen por:

- Alto volumen de producción y poca diversidad de trabajo.
- Gran variedad de funciones y baja escala de producción.

La manufactura discreta es principalmente concernida con horarios, control de materias, y asignación de trabajos. En el proceso de producción de bienes se distinguen cada etapa en el proceso que añade valor agregado al producto. De la misma manera se distinguen lotes de producción que se desplazan a lo largo de la línea de producción. Todo esto habla de la percepción del sistema de producción en la industria manufacturera como subsistemas de operación independiente con intercambio de información y material. Así, existe la posibilidad de separar al proceso completo en partes manejables.

Al considerar a la simulación como una opción para describir a un sistema, debe tomarse en cuenta el aspecto de pertenencia del proceso a modelar como parte de un todo con el que convive. Descartar aquellas ligas que no afectan en forma considerable al proceso y mantener otras que en cierto momento son cruciales en el desempeño del modelo. En el trabajo desarrollado se toma una parte del proceso total de la planta por su independencia operacional con otras instancias. Pero debe remarcase la dependencia con los departamentos de Almacén Calidad y Planeación en aquellas ligas que aceleran o retrasan a la producción.

7.3 BILIOGRAFÍA

1. John A. Buzacott, J George Shanthikumar
   Stochastic Models of Manufacturing Systems
   Prentice Hall 1993

2. N. Viswanadham Y. Narahari
   Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems
   Prentice Hall 1992

3. Ronald Asking
   Modeling & Análisis of Manufacturing Systems
   Jonh Wiley & Sons 1992

4. Lee W. Schruben
   Graphical Simulation Modeling and Analysis, Using SIGMA
   Boyd & Fraser 1995

5. Stochastic Modeling Analysis & Simulation
   Barry L. Nelson
   McGraw Hill 1995

6. Averill M. Law, W. David Kelton
   Simulation Modeling and Analysis
   McGraw-Hill 1991

7. Donald V. Rosato Plastics
   Processing Data Handbook
   Van Nostrand Reinhold 1989

APENDICE

A PROGRAMA DE SIMULACION

```
Attribute VB_Name = "ModServidores"
Option Explicit                 'Declaración de Variables

Public VAr(1 To 3, 1 To 3)      As Double 'Parámetros de Arribo de Materiales
Public VPr(1 To 3, 1 To 3)      As Double 'Parámetros de Producción
Public VRc(1 To 3, 1 To 3)      As Double 'Parámetros de Recolección
Public VFa(1 To 3, 1 To 3)      As Double 'Parámetros de Falla en el Proceso
Public VRp(1 To 3, 1 To 3)      As Double 'Parámetros de Reparación de Falla
Public VTo(1 To 3)              As Double 'Parámetros de Total de Cajas

Public XPP(1 To 3)              As Double 'Variable de Piezas Proyectadas en L. de E.
Public XPT(1 To 3)              As Double 'Variable de Producto Terminado
Public XRC(1 To 3)              As Double 'Variable de Producto Recolectado
Public XFA(1 To 3)              As Double 'Variable de Presencia de Falla
Public XSE(1 To 3)              As Double 'Variable de Máquina en Operación

Public YAR(1 To 3)              As Double 'Var. de Sal. de Arribos
Public YPT(1 To 3)              As Double 'Var. de Sal. de Servicios
Public YRC(1 To 3)              As Double 'Var. de Sal. de Recolección
Public YFA(1 To 3)              As Double 'Var. de Sal. de Porcentaje de Falla
Public YSE(1 To 3)              As Double 'Var. de Sal. de Porcentaje de Servicio

Public Pas(1 To 3)              As Double 'T(i,n)
Public Tie(1 To 3)              As Double 'T(i,n+1)

Public C(1 To 3, 1 To 5)        As Double 'Contadores de los i Eventos

Public Tiempo                   As Double 'T(n+1)
Public Pasado                   As Double 'T(n)
Public NN                       As Double 'Iteración n
Public Ini                      As Double 'Inicio de Toma de Parametros
Public Replica                  As Long   'Número de Replicas
Public Poli                     As Integer 'Politica: 1)Por Tiempo 2)Por Cantidad
Public Arribo                   As Integer '1ª Arribo: 1)Programado 2)Inmediato
Public Fin                      As Long   'Número de Iteraciones
Public TFinal                   As Long   'Tiempo Final
Public II                       As Long   'i-ésimo servidor
Public JJ                       As Long   'l-esimo evento
```

```
Public Sub E0()                    'Evento - Inicio de Producción

Dim I As Integer
Dim J As Integer

For I = 1 To 3                     'Inicio de Variables
   XPP(I) = 0
   XPT(I) = 0
   XRC(I) = 0
   XFA(I) = 0
   XSE(I) = 0
   YAR(I) = 0
   YPT(I) = 0
   YRC(I) = 0
   YFA(I) = 0
   YSE(I) = 0
   Pas(I) = 0
   Tie(I) = 0
   For J = 1 To 5
      C(I, J) = 1E+20
   Next J
Next I
Tiempo = 0.002
Pasado = 0.001

For J = 1 To 3                     'Inicio de Archivos de Salida
   Print #1, J; Tiempo; 0
   Print #2, J; Tiempo; 0
   Print #4, J; Tiempo; 0
   Print #5, J; Tiempo; 0
Next J
Print #3, 1; Tiempo; 0

NN = 0                             'Inicio de Contadores
II = 0
JJ = 0
Randomize

For I = 1 To 3                     'Programación de 1er Arribo
   If Arribo = 1 Then
      C(I, 1) = Funcion1(VAr(I, 1), VAr(I, 2))
   Else
      C(I, 1) = 0.01 + I / 100
   End If
Next I

End Sub
```

```
Public Sub E1()                    'Llegada de Materia Prima

Dim I As Integer
Dim J As Integer
Dim RES As Double
Dim T As Double

I = II

T = Tiempo                         'Salida a Archivo en Tiempo T(i,n)
RES = XPP(I) / VAr(I, 3)
Print #1, I; T; RES
RES = XSE(I)
Print #5, I; T; RES

If (XSE(I) = 0 And XFA(I) = 0) Then        'Programación de Próximo Eventos
   C(I, 2) = Tiempo + Funcion1(VPr(I, 1), VPr(I, 2))
End If
C(I, 1) = Tiempo + Funcion1(VAr(I, 1), VAr(I, 2))

XSE(I) = 1                         'Actualización de Variables
XPP(I) = XPP(I) + VAr(I, 3)

T = Tiempo                         'Salida a Archivo en Tiempo T(i,n+1)
RES = XPP(I) / VAr(I, 3)
Print #1, I; T; RES
RES = XSE(I)
Print #5, I; T; RES

End Sub


Public Sub E2()                    'Producción de Piezas

Dim I As Integer
Dim RES As Double
Dim T As Double

I = II

T = Tiempo                         'Salida a Archivo en Tiempo T(i,n)
RES = (XPT(I) * VPr(I, 3)) / VTo(I)
Print #2, I; T; RES; "INY"; (Tie(I) - Pas(I))
RES = XPP(I) / VAr(I, 3)
Print #1, I; T; RES
RES = XSE(I)
Print #5, I; T; RES
```

```
XPP(I) = XPP(I) - VPr(I, 3)          'Actualización de Var. y Programación
If (XPP(I) < 0) Then                 'Proximo Eventos
   XSE(I) = 0
   XPP(I) = 0
   C(I, 2) = 1E+20
End If
If XPP(I) = 0 Then
   XSE(I) = 0
   C(I, 2) = 1E+20
   XPT(I) = XPT(I) + VPr(I, 3)
End If
If XPP(I) > 0 Then
   XSE(I) = 1
   XPT(I) = XPT(I) + VPr(I, 3)
   C(I, 2) = Tiempo + Funcion1(VPr(I, 1), VPr(I, 2))
   If (C(I, 3) = 1E+20) Then
      C(I, 3) = Tiempo + Funcion1(VFa(I, 1), VFa(I, 2))
   End If
End If
If Poli = 1 Then
   If (C(1, 5) = 1E+20) Then         'Politica 1 de Recolección por Tiempo
      C(1, 5) = Tiempo + Funcion1(VRc(I, 1), VRc(I, 2))
   End If
Else                                 'Politica 2 de Recolección por Cantidad
   If (XPT(1) + XPT(2) + XPT(3)) > ((VTo(1) * VRc(1, 3)) + (VTo(2) * VRc(2, 3)) + (VTo(3)
* VRc(3, 3))) Then
      C(1, 5) = Tiempo + 1
    End If
End If

T = Tiempo                           'Salida a Archivo en Tiempo T(i,n+1)
RES = (XPT(I) * VPr(I, 3)) / VTo(I)
Print #2, I; T; RES; "INT"; (Tie(I) - Pas(I))
RES = XPP(I) / VAr(I, 3)
Print #1, I; T; RES
RES = XSE(I)
Print #5, I; T; RES

End Sub
```

```
Public Sub E3()                    'Falla Menor en el Proceso de Producción

Dim I As Integer
Dim RES As Double
Dim T As Double

I = II
T = Tiempo                         'Salida a Archivo en Tiempo T(i,n)
RES = XFA(I)
Print #4, I; T; RES
RES = XSE(I)
Print #5, I; T; RES

XSE(I) = 0                         'Actualización de Variables
XFA(I) = 1

C(I, 2) = 1E+20                    'Programación de Próximos Eventos
C(I, 4) = Tiempo + Funcion1(VRp(I, 1), VRp(I, 2))

T = Tiempo                         'Salida a Archivo en Tiempo T(i,n+1)
RES = XFA(I)
Print #4, I; T; RES
RES = XSE(I)
Print #5, I; T; RES

End Sub


Public Sub E4()                    'Reparación de Falla el Proceso

Dim I As Integer
Dim RES As Double
Dim T As Double

I = II

T = Tiempo                         'Salida a Archivo en Tiempo T(i,n)
RES = XFA(I)
Print #4, I; T; RES
RES = XSE(I)
Print #5, I; T; RES

XSE(I) = 0                         'Actualización de Variables
XFA(I) = 0

If (XPP(I) > 0) Then               'Programación de Próximos Eventos
   C(I, 2) = Tiempo + Funcion1(VPr(I, 1), VPr(I, 2))
```

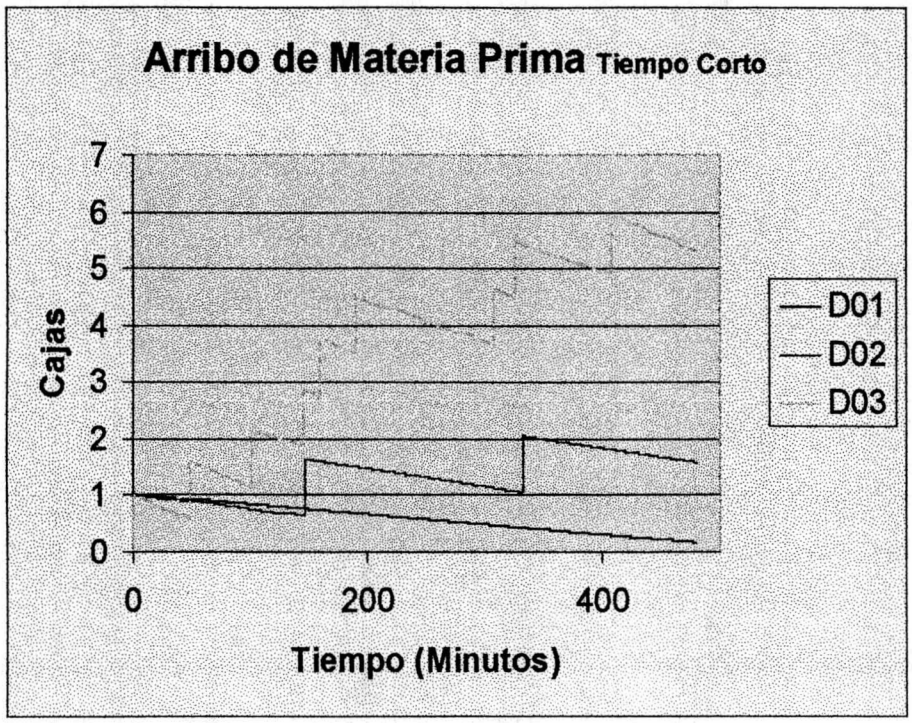
```
End If

T = Tiempo                          'Salida a Archivo en Tiempo T(i,n+1)
RES = XFA(I)
Print #4, I; T; RES
RES = XSE(I)
Print #5, I; T; RES

End Sub


Public Sub E5()                     'Recolección de Piezas

Dim I As Integer
Dim J As Integer
Dim K As Integer
Dim RES As Double
Dim T As Double
I = II
T = Tiempo                          'Salida a Archivo en Tiempo T(i,n)
RES = XRC(1) / (VTo(1) * VRc(1, 3) + VTo(2) * VRc(2, 3) + VTo(3) * VRc(3, 3))
XRC(2) = RES
XRC(3) = RES
If RES > 1 Then
   RES = 1
End If
Print #3, 1; T; RES
For J = 1 To 3
   RES = (XPT(J) * VPr(J, 3)) / VTo(J)
   Print #2, J; T; RES
Next J
If Poli = 1 Then                    'Politica 1 Recolección por Tiempo
   If (XSE(1) = 1 Or XSE(2) = 1 Or XSE(3) = 1) Then
      C(1, 5) = Tiempo + Funcion1(VRc(I, 1), VRc(I, 2))
   End If
End If

XRC(1) = 0                          'Actualización de Variables
For J = 1 To 3
   For K = 1 To (VTo(J) * VRc(J, 3))
      If (XPT(J) - VPr(J, 3)) > 0 And XRC(1) < (VTo(1) * VRc(1, 3) + VTo(2) * VRc(2, 3) +
VTo(3) * VRc(3, 3)) Then
         XRC(1) = XRC(1) + VPr(J, 3)
         XPT(J) = XPT(J) - VPr(J, 3)
      End If
   Next K
Next J
```

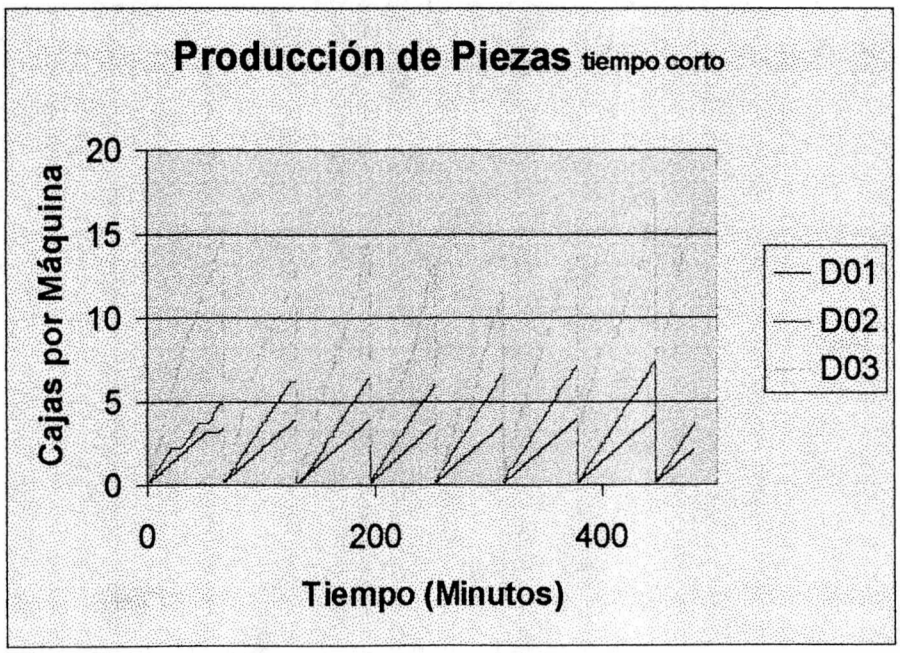
```
T = Tiempo                          'Salida a Archivo en Tiempo T(i,n)
RES = XRC(1) / (VTo(1) * VRc(1, 3) + VTo(2) * VRc(2, 3) + VTo(3) * VRc(3, 3))
XRC(2) = RES
XRC(3) = RES
If RES > 1 Then
   RES = 1
End If
Print #3, 1; T; RES
For J = 1 To 3
   RES = (XPT(J) * VPr(J, 3)) / VTo(J)
   Print #2, J; T; RES
Next J

End Sub


Function Funcion1(A As Double, B As Double) As Double      'Generador de valores X

Dim U(1 To 2) As Double
Static X(1 To 2) As Double

U(1) = Rnd
U(2) = Rnd

If B = 0 Then                       'Función Exponencial
   Funcion1 = -A * Log(U(2))
End If

If B > 0 Then
   If (-1) ^ (NN + 1) < 0 Then      'Funcion Normal
      X(1) = Sqr(-2 * Log(U(1))) * Cos(2 * 3.1416 * U(2)) * B + A
      Funcion1 = X(1)
      If Funcion1 < (A * 0.707) Then
         Funcion1 = A * 0.707
      End If
   Else
      X(2) = Sqr(-2 * Log(U(1))) * Sin(2 * 3.1416 * U(2)) * B + A
      Funcion1 = X(2)
      If Funcion1 < (A * 0.707) Then
         Funcion1 = A * 0.707
      End If
   End If
End If

End Function
```

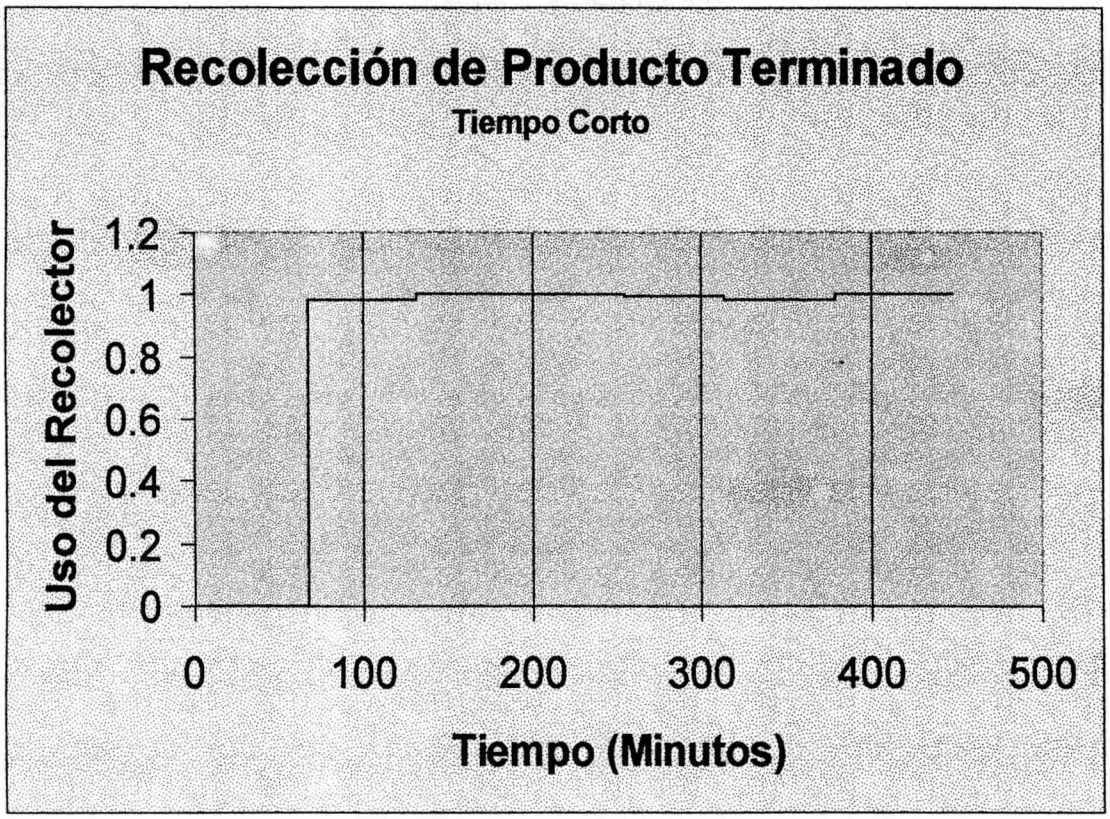
```
Public Sub TAmin()              'Tiempo Mínimo + Argumento Mínimo

Dim I As Integer
Dim J As Integer
Dim K As Integer
Dim L As Integer
Dim Min As Double

K = 1
L = 1

Min = C(K, L)

For I = 1 To 3                  'Calculo de C(i,j) Mínimo
   For J = 1 To 4
      If Min > C(I, J + 1) Then
         Min = C(I, J + 1)
         K = I
         L = J + 1
      End If
   Next J
   If I < 3 Then
      If Min > C(I + 1, 1) Then
         Min = C(I + 1, 1)
         K = I + 1
         L = 1
      End If
   End If
Next I

Pas(K) = Tie(K)                 'Ajuste de Tiempo
Tie(K) = Tiempo
Pasado = Tiempo
Tiempo = Min

II = K                          'Argumento (i,j) Mínimo
JJ = L

End Sub
```

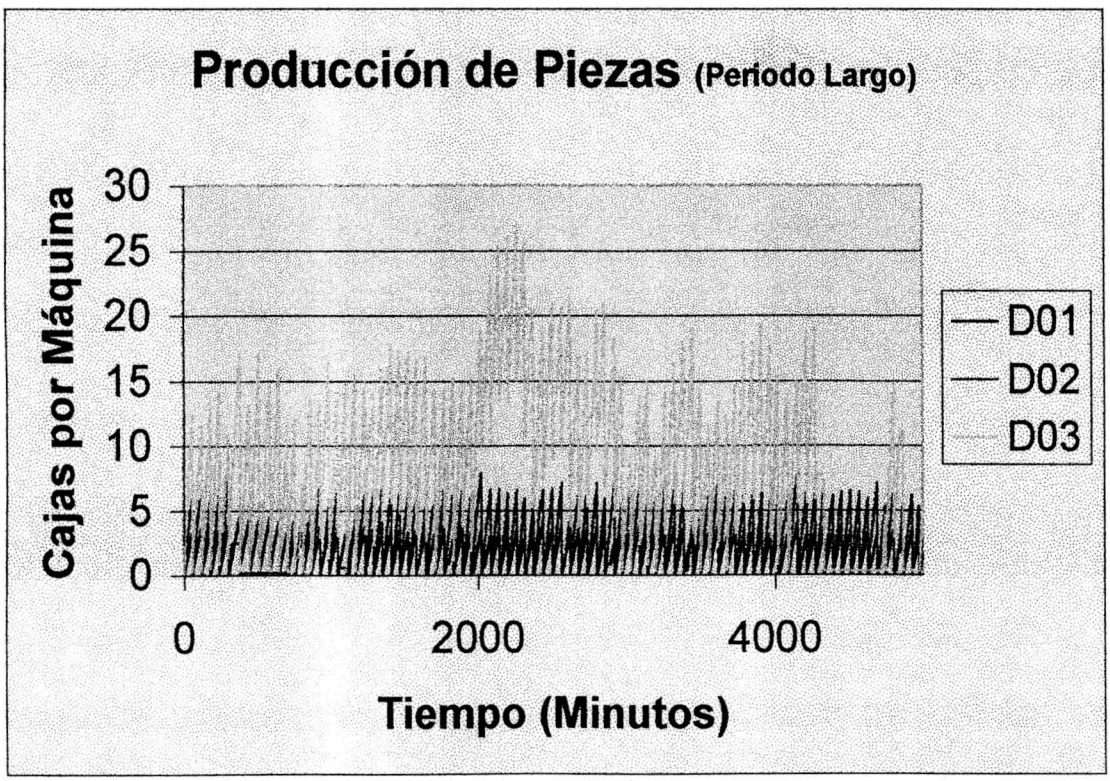
B GRAFICOS DE SIMULACION

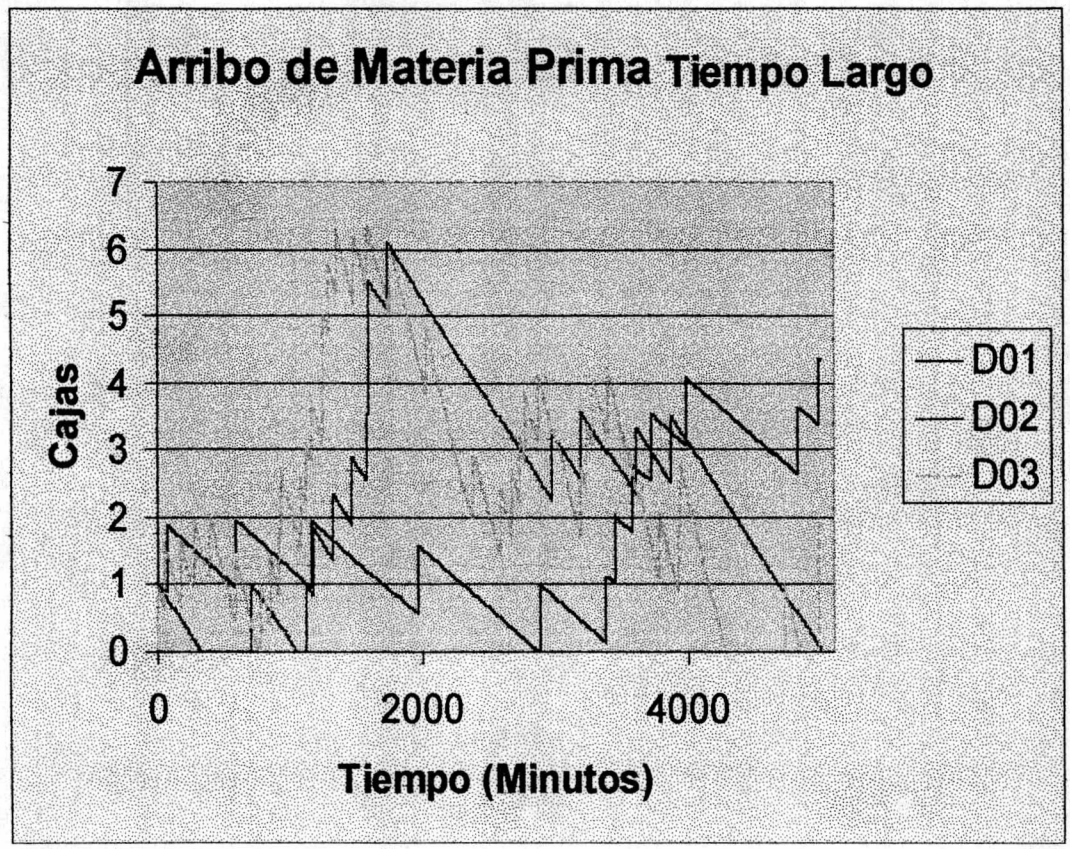
Simulación en Tiempos Cortos y Largos. Los parámetros son los mismos que para el Capitulo 6. El tiempo es correspondiente a un día laboral.






Recolección de Producto Terminado
Tiempo Corto
Uso del Recolector
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
100
200
300
400
500
Tiempo (Minutos)


Producción de Piezas (Periodo Largo)
Cajas por Máquina
30
25
20
15
10
5
0
0
2000
4000
Tiempo (Minutos)
D01
D02
D03


Arribo de Materia Prima Tiempo Largo
Cajas
7
6
5
4
3
2
1
0
0
2000
4000
Tiempo (Minutos)
D01
D02
D03