

SIMULACIÓN DE UN PROCESO PRODUCTIVO EN UN AMBIENTE DE
PERSONALIZACIÓN MASIVA A TRAVÉS DE REDES DE PETRI

SUGEY ANDREA CASTRO RIVERA
JUAN SEBASTIÁN CUERVO OLIVEROS



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ESTADÍSTICA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2011

SIMULACIÓN DE UN PROCESO PRODUCTIVO EN UN AMBIENTE DE
PERSONALIZACIÓN MASIVA A TRAVÉS DE REDES DE PETRI

SUGEY ANDREA CASTRO RIVERA
JUAN SEBASTIÁN CUERVO OLIVEROS

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero(a) Industrial

DIRECTOR:
M.C. PABLO CÉSAR MANYOMA VELÁSQUEZ



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y ESTADÍSTICA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2011

Nota de aceptación

Firma presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Santiago de Cali, Agosto del 2011

DEDICATORIA

A Dios por brindarme su luz y darme fortaleza.

A mi madre María Luisa Rivera y Mi Padre David Castro, por brindarme una amistad incondicional, por mi formación personal y profesional, y su esfuerzo por hacer de mi la mejor persona.

A mi Hermano por su comprensión y aceptación de aquellas horas que no podía compartir con él.

A Mayita por ser esa prima incondicional.

A todos mis amigos que mantuvieron siempre una palabra de aliento.

Y a todos aquellos que de una u otra manera hicieron posible la culminación de este trabajo

Sugey Andrea Castro

A Dios y a mi abuelo Lázaro María Oliveros por darme desde el cielo la fuerza y el tiempo suficiente de vida para la realización de este proyecto.

A mi madre Martha Lucía Oliveros Mira y a mi abuela Mariela Mira Flórez por haber realizado un gran esfuerzo para brindarme la mejor formación académica, por haberme educado como una persona con valores, lo cual me ha permitido ser todo lo que soy ahora.

A la familia Mira Silva por velar por mi bienestar en la ciudad de Cali.

A Javier Vidal, Alexander Moreno, Felipe Méndez, Richard Jairo López, María Domínguez en retribución por su amistad incondicional y por su incalculable generosidad.

Juan Sebastián Cuervo

AGRADECIMIENTOS

Queremos destacar en primer lugar a la Universidad del Valle y a su plantel de profesores por haber propendido por nuestra formación integral como profesionales de la ingeniería, especialmente a Pablo César Manyoma, Ingeniero Industrial y Maestro de Ciencia, por habernos brindado el apoyo y el conocimiento en la dirección de este trabajo de grado y a Juan José Bravo, Ingeniero Industrial y Maestro de Ciencia, por habernos introducido y consolidado nuestra formación en el área de la simulación.

También queremos agradecer a todos nuestros familiares, amigos y allegados que de una u otra manera influyeron para que este trabajo de grado se pudiera llevar a cabo satisfactoriamente, especialmente a la familia Castro Rivera y Oliveros Mira por cederle el tiempo y el espacio familiar a este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	12
2.1 Planteamiento del Problema	12
2.2 Objetivos.....	13
2.2.1 General	13
2.2.2 Específicos	13
3. CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN QUE TRABAJAN EN EL AMBIENTE DE PERSONALIZACIÓN MASIVA.	14
3.1 Características Generales	14
3.1.1 ¿Qué es Personalización Masiva?	14
3.1.2 Fortalezas y Debilidades	14
3.1.3 Enfoques de la Personalización Masiva.....	16
3.1.4 Métodos de planeación y programación de la producción, control de calidad e integración de la cadena de abastecimiento para la Personalización Masiva	17
3.1.5 Interacción del cliente y otros factores externos.....	19
3.1.6 Productos fabricados en el ambiente de Personalización Masiva.....	19
3.2 La Personalización Masiva frente a otros sistemas de producción.....	20
3.2.1 Personalización Masiva y Job-Shop.....	21
3.2.2 Personalización Masiva y Producción en Masa (Flow Shop)	26
4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y OPERATIVAS DE LAS REDES DE PETRI.	33
4.1 Aspectos Generales.....	33
4.1.1 Redes de Petri Coloreadas	37
4.1.2 Redes de Petri con Tiempo	42
4.2 Herramientas computacionales para simular Redes de Petri.	44
4.2.1 Simulador Arena.....	45
4.2.2 Simulador Witness	46
4.2.3 Microsoft Excel ®	48
4.3 Casos y análisis de algunas herramientas de simulación.....	48

4.3.1	CASO1. Modelación, Análisis y simulación de un Sistema de Manufactura Flexible, utilizando la generación de Redes de Petri estocásticas y SIMAN/ARENA. [LEE (2004)].....	48
4.3.2	CASO2. Investigación sobre la modelación y simulación para mejorar la eficiencia para una empresa con ambiente de manufactura Job-Shop, [LI- CHIH, W. y SHAO-YING, W (1998)].....	50
5.	CASO ESTUDIO	52
5.1	Características del Caso Estudio	53
5.1.1	Descripción Operaciones	53
5.1.2	Diagrama de Operaciones	55
5.1.3	Tiempos de Operación	56
5.1.4	Tipo de Personalización	57
5.2	Indicadores	58
5.2.1	Indicadores de Nivel de Personalización.....	58
5.2.2	Indicadores de Flexibilidad	59
5.3	Parámetros	60
5.4	Casos a simular.....	61
5.4.1	Caso inicial.....	61
5.4.2	Caso Mejorado	61
5.5	Redes de Petri Caso Estudio.....	62
5.5.1	Red de Petri Inicial	62
5.5.2	Red de Petri mejorada	66
5.6	Herramienta Computacional para simular.....	70
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN	71
6.1	Resultado de la Simulaciones.....	71
6.2	Análisis de la Simulaciones	73
7.	CONCLUSIONES	74
8.	BIBLIOGRAFÍA	76
9.	ANEXOS	81

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Enfoques de la Personalización Masiva-----	16
Figura 2. Composición de un sistema de Manufactura Integrado por Computador	24
Figura 3. Métodos para lograr la personalización masiva -----	27
Figura 4. Representación gráfica de los elementos de una Red de Petri -----	34
Figura 5. Red de Petri que representa una máquina. -----	34
Figura 6. Red de Petri que representa una máquina después de ser activadas las transiciones. -----	35
Figura 7. Red de Petri Clásica y Red de Petri Coloreada de una secuencia de tareas sobre dos tipos diferentes de piezas.-----	40
Figura 8. Ruta de procesamiento de las Piezas Tipo A y B.-----	43
Figura 9. Interfaz Witnes-----	47
Figura 10. Diagrama de Operaciones Caso Estudio.-----	55
Figura 11. Diagrama Red de Petri Caso Inicial -----	63
Figura 12. Diagrama Red de Petri Caso Mejorado-----	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de la Manufactura Ágil	22
Tabla 2. Transiciones Redes de Petri Clásica y Coloreada	38
Tabla 3. Lugares Redes de Petri Clásica y Coloreada	39
Tabla 4. Simuladores apropiados para investigación e uso industrial	45
Tabla 5. Descripción de operaciones	56
Tabla 6. Tiempos Por Operación.....	57
Tabla 7. Transiciones Red De Petri Caso Inicial	64
Tabla 8. Lugares Red De Petri Caso Inicial	64
Tabla 9. Colores Red De Petri Caso Inicial.....	65
Tabla 10. Conjunto de Colores Asociados a Cada Lugar, Red De Petri Caso Inicial	65
Tabla 11. Transiciones Red De Petri Caso Mejorado	68
Tabla 12. Lugares Red De Petri Caso Mejorado	68
Tabla 13. Colores Red De Petri Caso Mejorado.....	69
Tabla 14. Conjunto de Colores Asociados a Cada Lugar, Red De Petri Caso Mejorado	69
Tabla 15. Resultados Media Muestral y Tamaño de Muestra	72
Tabla 16. Indicadores de Utilización de las Máquinas y Ocupación de los operarios	72
Tabla 17. Variación Porcentual de los Indicadores	73

TABLA DE ANEXOS

ANEXO 1. Resultados de los indicadores de utilización en las simulaciones.....	81
ANEXO 2. Simulaciones complementarias para alcanzar el tamaño muestral adecuado	82
ANEXO 3. Número de zapatos fabricados en una jornada laboral.....	83
ANEXO 4. Ejemplo de Simulación Caso Inicial	84
ANEXO 5. Ejemplo de Simulación Caso Mejorado	87

1. INTRODUCCIÓN

Durante la historia han surgido diferentes formas de manufacturar bienes, según Eastwood (1996), tradicionalmente estas formas de producción se han dividido en dos: la producción masiva y la producción por proyectos. La primera se caracteriza por manufacturar alto volumen, tener poca mezcla de productos y aprovechar las economías de escala para mantener bajos los costos de producción; la segunda se caracteriza por manufacturar bajo volumen, ofrecer alta mezcla de operaciones e individualización.

Empero, en la actualidad los consumidores desean encontrar en un solo producto los beneficios que ofrecen estos dos ambientes de producción. Para satisfacer estas nuevas exigencias, McCarthy (2004), opina que los gerentes tienen que enfrentarse al diseño y a la ejecución de sistemas de producción integrados, los cuales puedan acomodarse al incremento simultáneo de la variedad e incertidumbre.

La modelación matemática y la simulación son algunos de los métodos que han permitido el acercamiento exitoso entre la industria y la academia en diferentes campos de investigación, este hecho permite considerar estos métodos como herramientas acordes para encontrar caminos que conduzcan a aplicar eficientemente la Personalización Masiva.

Este trabajo de grado, muestra la simulación con Redes de Petri del sistema productivo de una industria del sector de calzado, la cual trabaja bajo un ambiente de Personalización Masiva. La simulación muestra el comportamiento de la línea de producción, a partir de este comportamiento se identifican oportunidades de mejora con respecto a indicadores de personalización y flexibilidad del proceso de producción.

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 Planteamiento del Problema

En Colombia el sistema de producción en masa es el más utilizado por las empresas, según Safón (1997), cuando Henry Ford desarrolla este sistema, se crea el paradigma que los productos estándar son de bajo costo y son entregables en un corto plazo, a diferencia de los bienes artesanales de finales del siglo XIX, que a pesar de ser personalizados eran costosos y demorados en la entrega.

Sin embargo, a nivel mundial este paradigma ha empezado a ser sustituido por el de la Personalización Masiva (los productos personalizados pueden tener los beneficios de los productos estándar), debido a los nuevos patrones de consumo y el uso masivo e intensivo de las tecnologías de la información. Es por esto que “en la actualidad los gerentes tienen el reto de diseñar y operar sistemas de producción integrados, que puedan acomodarse al incremento tanto de variedad como de incertidumbre, para poder explotar los beneficios de la producción en masa, y al mismo tiempo satisfacer necesidades individuales del mercado”, McCarthy (2004).

Para afrontar el reto anteriormente mencionado, los gerentes y las empresas deben adoptar una serie de estrategias empresariales, según Daniels (2004) las más importantes son:

- Eficiencia en los costos de manufactura,
- Ofrecer confiabilidad en los productos y/o servicios, a través de la calidad, rápida entrega, y servicios postventa,
- Flexibilidad relacionada con la capacidad para fabricar diferentes tipos de productos y ajustar el volumen de producción.
- Innovación, para tener la capacidad de desarrollar nuevos productos y procesos.

La mayoría de estas estrategias se consolidan con la Personalización Masiva, debido a que ésta “más que un modelo de producción, se considera como una estrategia táctica de negocio”, Avella y Vázquez (2005). Sin embargo, en

Colombia éste es un término que ha sido poco implementado y analizado, porque como se mencionó, aún sigue muy arraigado el sistema de producción en masa.

Por lo tanto, analizar y comprender los elementos que componen la estrategia de Personalización Masiva es importante tanto para la academia como para la industria. Sin embargo, también es importante direccionar los esfuerzos de estos sectores en materia de investigación y desarrollo, hacia la forma de cómo practicar eficientemente esta estrategia en el sector manufacturero, y así brindar la posibilidad de aprovechar las ventajas competitivas que ésta ofrece.

2.2 Objetivos

2.2.1 General

Simular un proceso productivo utilizando Redes de Petri, que permita mejorar los indicadores de flexibilidad de manufactura y niveles de individualización, en un ambiente de Personalización Masiva, a través de un caso estudio.

2.2.2 Específicos

1. Comparar las características operativas de la Personalización Masiva con otros sistemas de producción, para identificar los diferentes criterios que hacen particular éste ambiente.
2. Analizar las características técnicas y operativas de las Redes de Petri como representación de un sistema, con el fin de identificar sus usos en cualquier ambiente de producción.
3. Elaborar un caso estudio y diseñar un modelo, el cual permita apoyar la implementación de la Personalización Masiva y validarlo en dicho caso.

3. CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN QUE TRABAJAN EN EL AMBIENTE DE PERSONALIZACIÓN MASIVA.

3.1 Características Generales

3.1.1 ¿Qué es Personalización Masiva?

La Personalización Masiva es descrita desde varios puntos de vista, por ejemplo: los consumidores perciben la Personalización Masiva como la oportunidad de obtener un bien que se adapte a sus necesidades individuales, sin incurrir en sobrecostos por obtener este beneficio. Por otro lado, para las compañías, la Personalización Masiva significa “La capacidad que tiene el sistema de manufactura para producir bienes personalizados en altos volúmenes, para los mercados masivos, por medio de variaciones a un único o pocos productos básicos” Blecker (2005).

Subyacente en las dos perspectivas anteriores, se encuentra que la Personalización Masiva es un nuevo paradigma, porque cambia con los supuestos de los modelos Fordistas (Sistemas de Producción en Masa), al igual que con los supuestos de los modelos Post-Fordistas (Sistemas de Producción Job-Shop). Es por esto que la Personalización Masiva brinda nuevas ventajas competitivas a las compañías, las cuales les permitirán mantenerse y competir en el mercado mundial actual.

3.1.2 Fortalezas y Debilidades

La Personalización Masiva es un tema que está siendo cada vez más investigado por los académicos y por los empresarios con el paso del tiempo, debido a los muchos casos exitosos de implementación de este nuevo paradigma en sistemas productivos y estrategias para mejorar la satisfacción del cliente. Este último punto es muy importante, ya que los clientes modernos son más exigentes porque además de querer precios bajos y alta calidad, también desean satisfacer sus necesidades de tal manera que puedan expresar su identidad con el producto.

En este sentido Michel Dell llega a la conclusión que “las compañías exitosas son aquellas que están más cerca de las necesidades de sus clientes”. Sin embargo, Madiedo y Thiell (2009) afirman para que las compañías logren esto deben adoptar estrategias que se caractericen por los siguientes aspectos:

- **Integración del consumidor:** de forma similar a los procesos de servicios, los consumidores deben ser integrados a la planeación de la producción (utilizando, por ejemplo, configuradores de producto), esto trae como consecuencia una variedad en el producto, para lo cual se requiere que la producción sea flexible y se gestione con base en las órdenes de los consumidores.
- **Modularización:** los componentes modulares se diseñan para ser configurados en una amplia variedad de productos, lo cual hace posible obtener economías de escala a nivel del componente y economías de alcance a nivel del módulo. La función de mercadeo debe identificar el nivel óptimo de personalización, sin abrumar al cliente con la cantidad de opciones disponibles.
- **Tecnologías de información (T.I):** las T.I son utilizadas como herramientas de comunicación para integrar la cadena de suministros y de gestión de la información del mercado, con el ánimo de obtener un perfil preciso del consumidor y encontrar la forma adecuada para que los productos o servicios lleguen a éste. Esta información puede ser utilizada para asignar precios específicos a clientes particulares o aprovechar las oportunidades que brinda el mercado, antes que la competencia.

Todas estas características se aplican de una forma eficiente en la Personalización Masiva y en muchos casos hacen que este modelo tome ventaja con respecto a otros. La lealtad entre los proveedores y la compañía también es una ventaja que se puede alcanzar con este modelo, ya que la interacción entre estos y en general entre todos los eslabones de la cadena de suministros es fuerte y con tecnología avanzada.

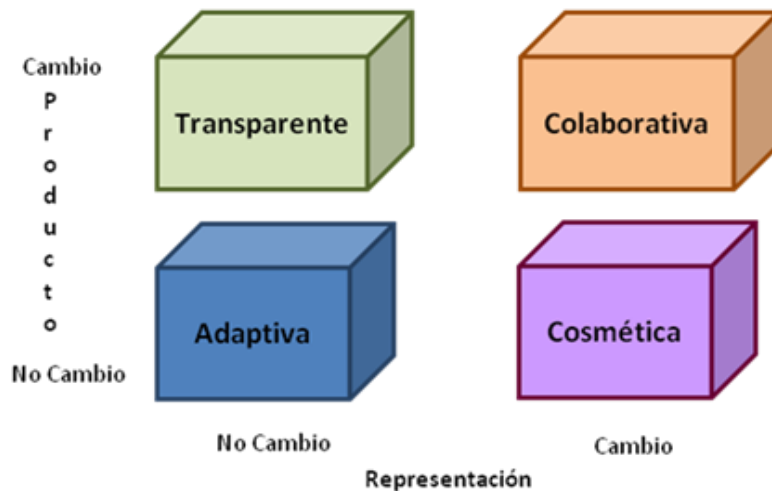
Es importante resaltar que la implementación de la Personalización Masiva representa una ventaja competitiva principalmente para aquellas compañías que se enfrentan a mercados heterogéneos, demandas fragmentadas y productos cuyo ciclo de vida es corto; sin embargo para empresas cuyo mercado sea homogéneo, con demanda estable y sus productos tenga un ciclo de vida prolongado la implementación de este modelo podría generar el desequilibrio financiero debido a la gran inversión que se requiere y a los pocos beneficios que podría traer consigo, [Madiedo y Thiell (2009)].

Para finalizar se puede decir que el éxito en la implementación de la Personalización Masiva depende de muchos factores, tanto internos como externos, por tal motivo es importante llevar a cabo estudios minuciosos que permitan predecir lo más preciso posible el comportamiento del sistema en este ambiente y hacer un análisis comparativo entre modelos, porque la Personalización Masiva tiene ventajas y desventajas que deben ser cuantificadas y evaluadas para tomar la mejor decisión para el negocio.

3.1.3 Enfoques de la Personalización Masiva

El concepto de personalizar un producto es muy amplio, éste contempla desde la elección de los más pequeños detalles hasta la definición completa de un producto por parte del cliente, y para agrupar toda esta gama de posibles personalizaciones Gilmore y Pine II (1997) definen cuatro enfoques, los cuales son definidos a continuación:

Figura 1. Enfoques de la Personalización Masiva



Fuente: Gilmore Y Pine II (1997)

1. **Personalización Colaborativa:** Este enfoque realiza un diálogo con los diferentes tipos de clientes para ayudar a expresar sus necesidades, a partir de este dialogo se define la oferta precisa que cumple aquellas necesidades expuestas y se elaboran los productos a medida. Este tipo de Personalización es apropiada para los negocios que se enfocan en los clientes que no saben lo que desean, y se encuentran frustrados cuando se ven obligados a elegir entre una gran cantidad de opciones.

- 2. Personalización Adaptiva:** Este enfoque se caracteriza por ser apropiado para aquellos negocios donde los clientes desean que el producto funcione de diferentes formas en diferentes ocasiones, y la tecnología haga posible personalizar el producto con facilidad.

Este tipo de personalización, crea bienes y servicios estándar que pueden ser fácilmente adaptables, modificables o configurables para satisfacer las necesidades de cada cliente, donde la interacción del cliente con la empresa físicamente es nulo.

- 3. Personalización Cosmética:** Este enfoque presenta un producto estándar con una presentación diferente para cada tipo de cliente. Es apropiado para aquellos consumidores que utilizan un producto con el mismo fin pero igualmente desean que éste se diferencie de los demás. Diseñar y comunicar estrategias de promoción de manera diferente y poner el nombre del cliente en el artículo son algunos ejemplos típicos de este enfoque.

- 4. Personalización Transparente:** Se encarga de brindar productos a los clientes individuales de bienes o servicios únicos, sin hacerles saber explícitamente que los productos y servicios han sido preparados para ellos. El enfoque es apropiado cuando las necesidades específicas de los clientes son predecibles o fácilmente pueden deducirse, y especialmente cuando los clientes no quieren expresar sus necesidades. En este enfoque se observa directamente el comportamiento de los clientes y luego discretamente se personalizan las ofertas estándar.

3.1.4 Métodos de planeación y programación de la producción, control de calidad e integración de la cadena de abastecimiento para la Personalización Masiva

En todos los ambientes de producción es importante tener estrategias claras y direccionadas en los procesos tácticos, estratégicos y de apoyo para lograr los objetivos corporativos. Por ello, se hace importante presentar ejemplos de cómo se han desarrollado en ambientes de Personalización Masiva los procesos más comunes en las compañías, como los son la administración de la información, el control de calidad, la planeación y programación de la producción, entre otros.

En este sentido uno de los procesos que debe ser visto desde una nueva perspectiva es el control de calidad, los esquemas tradicionales como son la

gráficos de control estadístico no son eficientes en la Personalización Masiva porque estos métodos no son fácilmente adaptables a este ambiente, esto se debe principalmente a que “estos esquemas controlan las características de calidad a partir de la observación y la relación con un comportamiento de referencia” [Da Silveira et al (2001)] y la Personalización Masiva no ofrece la repetitividad necesaria para llevar a cabo este procedimiento de una manera correcta, por tal motivo Da Silveira et al (2001), propone el monitoreo de procesos como método para asegurar la calidad en los productos personalizados masivamente.

Otros atributos del nuevo paradigma de la Personalización Masiva, y a los cuales se les debe evaluar la aplicación de los métodos tradicionales empleados por las compañías manufactureras son “orientación al cliente y a la calidad total, elevada variedad de productos, diseños colaborativos, volúmenes de producción ajustados, tecnologías avanzadas y automatizadas, empowerment como estrategia de gestión del personal” [Avella y Vásquez (2005)]. Debido a que estas características afectan el proceso productivo, las estrategias gerenciales y en general a todas las partes y procesos tanto de la compañía como de la cadena de abastecimiento, por tal razón la Personalización Masiva no puede ser definida simplemente como un sistema de producción, sino que va más allá.

Según lo anterior, los procesos funcionales de la empresa (Producción, planeación de la producción, etc) se delegan a las Tecnologías Avanzadas de Producción e Información, como por ejemplo Sistemas de Manufactura Flexible (SMF), Manufactura Integrada por Computador (CIM), Simulación De Líneas De Fabricación y Sistemas De Manufactura Holónicos, las cuales permiten que las compañía programen y ejecuten en tiempo real, los requerimientos del cliente en las estaciones de trabajo, como se aprecia en el caso exitoso de Motorola, [Eastwood (1996)] y la industria del calzado [Barnett, Rahimifard y Newman (2004)]

Como ya se mencionó la Personalización Masiva afecta desde el proveedor de materias primas hasta el cliente final, por este motivo es necesaria la correcta gestión de la cadena de abastecimiento. Da Silveira et al (2001) propone tres condiciones que facilitan la coordinación organizacional, ellos son:

- Desarrollo de una red de información interconectada que involucre a un grupo selecto de proveedores entrenados.

- Balance exitoso de bajos niveles de inventario y alto nivel de servicio al cliente.
- Diseño de productos innovadores con la colaboración activa de los proveedores.
- Distribución efectiva del producto adecuado, al cliente adecuado en el momento justo.

3.1.5 Interacción del cliente y otros factores externos

Actualmente, los consumidores tienen más información acerca de los productos y más productos para escoger, tienen más formas de comprar como por ejemplo en centros comerciales, tiendas especializadas, super- tiendas, a través del correo, con catálogos, de manera virtual en Internet, con mensajes enviados a través de un creciente número de canales de televisión, radio, internet, teléfono, revistas y otros. Dada la proliferación de opciones, no es raro que los consumidores vean a las marcas con creciente indiferencia, [McKenna (1995)] . Los consumidores de hoy, ya sean individuos o empresas, no desean tener más opciones, desean tener exactamente lo que quieren (cuando, donde y como ellos lo quieren), [Pine II et al. (1995)]. Esto indica que ha habido un cambio en la relación de poder entre el vendedor y el consumidor, porque la posición del consumidor se ha fortalecido.

En este sentido la Personalización Masiva es una buena opción porque aumenta los beneficios de la oferta, al acercar más el producto a las necesidades del consumidor, al mismo tiempo que reduce los sacrificios típicos asociados a la personalización, esto es importante porque no se pierde el valor del producto para el consumidor, teniendo en cuenta que este valor se define con base en diferentes dimensiones, siendo la personalización tan solo una de ellas (se puede hablar del valor asociado al precio, a la calidad, a la entrega, al nombre de la marca, y a los servicios asociados al producto, entre otros) [Squire et al.(2004)].

3.1.6 Productos fabricados en el ambiente de Personalización Masiva

El auge de la Personalización Masiva hace que sea importante mencionar la existencia de mercados masivos para productos personalizados. Entre los productos personalizados que han evidenciado el uso de la Personalización Masiva se incluyen artículos de vestir (ropa, zapatos, joyas, accesorios), artículos para la construcción, artículos para el hogar y la oficina (computadoras, muebles, arte, alfombras), medios (música, televisión, libros, fotografías), cuidado personal (cosméticos, vitaminas, jabón), servicios (vacaciones, entrenamiento, hipotecas,

fiestas), artículos deportivos (para golf, beisbol, fútbol, ciclismo, ski), publicaciones e impresiones, automóviles, regalos, comida, artículos para mascotas, botes, etc.

Algunos ejemplos de las empresas que tiene Personalización Masiva son:

- **Levi Strauss & Co:** esta empresa implementa la Personalización Masiva colaborativa y del diseño al ofrecer a sus consumidores estadounidenses el programa Original Spin, que les permite ordenar un jean Levi's a su medida partiendo desde un modelo existente o desde cero. Para ello el consumidor debe visitar una de las tiendas que forma parte del programa, donde le ayudarán a diseñar el jean que le permita expresar su propia individualidad (eligiendo un modelo, bota, tela y forma de abrochar). Una vez ordenado, el pedido es enviado a la fábrica y se entrega en 2 o 3 semanas.
- **Motorola, Nokia:** algunos de los modelos de aparatos de telefonía celular (entre los que se pueden mencionar el Motorola C-358 y el Nokia 2112) comercializados por empresa como Motorola y Nokia, ofrecen diferentes cubiertas entre las cuales el cliente puede elegir de acuerdo con su gusto personal. Este es un ejemplo de Personalización Masiva adaptativa, realizada por el cliente, luego de la entrega del producto.

3.2 La Personalización Masiva frente a otros sistemas de producción

En general, la demanda de bienes y servicios en los mercados mundiales muestra comportamientos semejantes, éstos se clasifican en tres grandes grupos:

- Demanda Estable, i.e. Demanda Constante, Demanda Perpetua, Demanda con tendencia.
- Demanda Inestable., i.e. Demanda Estacional
- Demanda Impredecible, i.e. Demanda Errática.

A cada uno de estos grupos Carmo-Silva, Alves y Moreira (2006) le asignan tres paradigmas de producción, el paradigma de la producción en masa, la producción repetitiva (fabricación repetida de un número variado de productos con pocas diferencias en los requerimientos de producción) y la producción no repetitiva (fabricación de productos personalizados, diferentes a los fabricados anteriormente, en un mercado con demanda turbulenta e impredecible),

respectivamente, por lo cual el patrón de demanda es un elemento útil para determinar el sistema de producción.

Sin embargo, es ineficaz utilizar únicamente el patrón de demanda para diseñar y gestionar el sistema de producción, ya que estos procesos son claves para lograr los objetivos estratégicos de las compañías. Con el fin disminuir esta ineficacia es importante realizar una comparación entre los diferentes sistemas de producción, porque ésta permite a las compañías ponderar un mayor número de factores y tomar decisiones operativas que estén más alineadas con los objetivos corporativos.

3.2.1 Personalización Masiva y Job-Shop

En la década de los 70's ocurren cambios significativos en las tecnologías y en las características de los mercados, los cuales modifican los supuestos fundamentales de la producción en masa, y esto conlleva a que los sistemas de producción que trabajaban bajo esta filosofía entren en una etapa de recesión. Para adaptarse a estos cambios, las compañías buscaron soluciones organizativas y tecnológicas acordes con este nuevo entorno; es así como surgen los modelos flexibles de producción, de organización de la producción y de gerencia.

Japón fue quien lideró los cambios en la manufactura mundial [Safón (1997)], con los sistemas de producción que él denomina post-fordistas (Job-Shop) y neo-fordistas (Personalización Masiva), los cuales involucran al consumidor en las especificaciones del producto (por esta razón dichos sistemas están asociados directamente con la personalización de productos), y son capaces de satisfacer dichas exigencias de los clientes en diferentes tipos de mercados.

A pesar que los sistemas Job-Shop y Personalización Masiva se originan en circunstancias similares y que tienen características semejantes, son sistemas que tienen grandes diferencias. Respecto a estas diferencias Safón (1997) opina:

“Aún cuando guardan gran similitud, el neo-fordismo (Personalización Masiva) se debe separar conceptualmente del post -fordismo (Job-Shop). El neo-fordismo representa una reinterpretación del paradigma fordista (Producción Masiva) y del modelo de regulación económica en masa a escala internacional y macroeconómica. Supone un desarrollo de la producción en serie hacia la diferenciación de productos; todo ello gracias al

uso de la automatización flexible y de las tecnologías de información, pero -y esto es lo importante- sobre las bases de las mismas pautas de regulación definidas en la era fordista, o sobre una síntesis de éstas. En este caso neo-fordismo significaría evolución y post-fordismo cambio y ruptura con la situación anterior.”

Otra característica del sistema Job-Shop que muestra una diferencia con el sistema de Personalización Masiva es la señal que determina el inicio de la producción, para los sistemas que funcionan bajo el modelo Job-Shop la única señal para que los productos comiencen a ser elaborados es un pedido del cliente, mientras que los sistemas que funcionan bajo el modelo de Personalización Masiva pueden combinar diferentes señales, por ejemplo pueden utilizar un punto de re-orden para ciertos componentes del producto y esperar el pedido del cliente para definir las características especiales y terminar el producto.

Los sistemas de Personalización Masiva y Job Shop a pesar de ser sistemas de producción diferentes tienen similitudes, una de esas similitudes es que dichos sistemas se basan en sub-sistemas de producción autónomos que se interrelacionan. Usualmente, estos sub-sistemas son diferentes tipos de células de manufactura o unidades de producción orientadas a funciones específicas.

Un ejemplo de un sub-sistema de la Personalización Masiva es la **Manufactura Ágil**, el cual ha tenido varios estudios acerca de estrategias de fabricación y modelos productivos en un mundo dinámico. Avella y Vásquez (2005) definen la Manufactura Ágil como “un modelo de producción que integra la tecnología, los recursos humanos con la organización, a través, de una infraestructura de comunicación e información que otorga flexibilidad, rapidez, calidad y eficiencia, que permite responder de forma deliberada, efectiva y coordinada ante cambios en el entorno”.

Adicionalmente, mencionan las siguientes características y prácticas de la Manufactura Ágil:

Tabla 1. Características de la Manufactura Ágil

CARACTERÍSTICAS DE LA MANUFACTURA ÁGIL

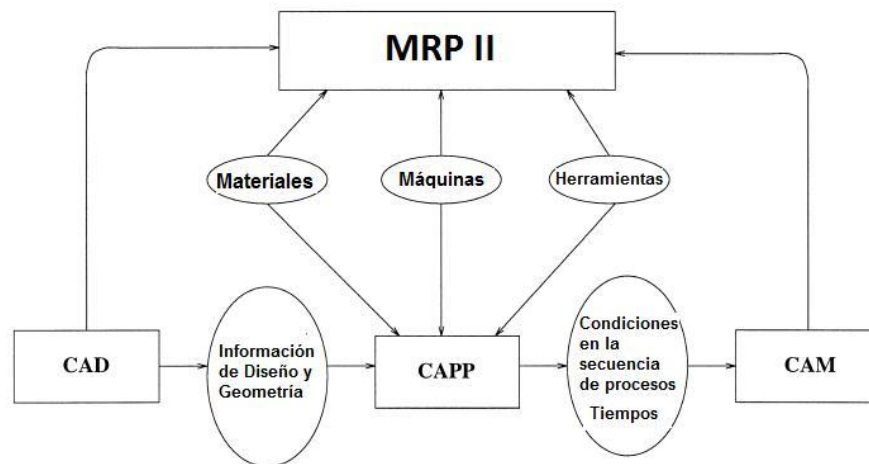
Entorno competitivo	Entorno inestable, incierto, impredecible, competitivo.
Productos	Soluciones basadas en el valor.
Volumen	Todos los niveles de producción.
Diseño del producto	Diseño colaborativo con participación significativa de proveedores y clientes.
Maquinaria	Equipamiento fiable y flexible.
Operaciones y procesos	Procesos de fabricación flexibles.
	Mejora continua y radical.
	Utilización de tecnología de la información.
	Reingeniería de los procesos de negocio.
	Economías de escala y alcance.
	Tiempos de preparación y cambio de maquinaria reducidos.
	Reducidos tiempos de ciclo.
Gestión de la calidad	Calidad medida mediante la satisfacción del cliente.
	Gestión de la Calidad Total (TQM).
Estructura organizativa	Organizaciones virtuales establecidas interna y externamente.
	Implicación de los proveedores basada en la confianza.
	Estructura basada en equipos multidisciplinares.
Gestión del Recurso Humano	Cultura empresarial emprendedora.
	Elevada valoración de los individuos ágiles.
	Elevado valor de los conocimientos, la información y la diversidad de capacidades de los empleados.
Énfasis	Flexibilidad frente a los cambios imprevistos.
	Elevada capacidad de respuesta ante cualquier cambio u oportunidad.

Fuente: Avella Y Vásquez (2005)

- Prácticas de la Manufactura Ágil relacionadas con las tecnologías y los sistemas:** En los países desarrollados la tendencia de estas prácticas de la Manufactura Ágil están siendo dominadas por la Manufactura Integrada por Computador (de sus siglas CIM, Computer- Integrated Manufacturing), el término se refiere a la integración total del diseño e ingeniería del producto, planificación y manufactura por medio de un sistema de computación, es decir,

la integración de CAD/CAE, CAPP y CAM¹ (Ver figura 2). Según Krajewski y Ritzman (2000), al usar estos poderosos sistemas de computación para integrar todas las fases de la manufactura, las empresas esperan incrementar la productividad, mejorar la calidad, satisfacer más rápidamente las necesidades del cliente y brindar mayor flexibilidad. A continuación se presenta una breve definición de cada uno de los componentes del C.I.M

Figura 2. Composición de un sistema de Manufactura Integrado por Computador



Fuente: SSemakula (1990)

- **Planeación de Procesos Asistida por Computador (CAPP)(del inglés Computer- Aided Process Planning):** Según Cay y Chassapis (1997) el propósito de la Planeación de Procesos Asistida por Computador es automatizar la interpretación de los diseños de productos, la elaboración de las hojas de rutas de los productos, la secuenciación de operaciones, la selección de lotes de inspección, la determinación de tolerancias de producción y la duración total de producción, garantizando que el flujo de materiales sea constante.
- **Manufactura Asistida por Computador (CAM)(del inglés Computer-Aided Manufacturing):** Según Krajewski y Ritzman (2000), “es el componente de la Manufactura Integrada por Computador, que se ocupa directamente de las operaciones de manufactura y se utiliza para diseñar procesos de producción y controlar máquinas y flujo de materiales”. Es importante mencionar que la

¹CAD/CAE: Computer-Aided Design/Computer-Aided Engineering, CAPP: Computer-Aided Process Planning y CAM: Computer-Aided Manufacturing.

Manufactura Asistida por Computador también se puede apoyar en otras tecnologías para hacer más eficiente el proceso productivo, por ejemplo para controlar el flujo de materiales se pueden utilizar Vehículos Guiados Automáticamente (AGV) (Automated Guided Vehicle) y un Sistema Automatizado de Almacenaje y Dispensación (AS/RS) (Automated Storage and Retrieval System). Según Krajewski y Ritzman (2000):

Un Vehículo Guiado Automáticamente es un pequeño camión, impulsado por baterías, que acarrea materiales entre las operaciones, siguiendo las instrucciones de una computadora que lleva a bordo, o de una computadora central. Un Sistema Automatizado de Almacenaje y Dispensación es un método controlado por computadora para almacenar y recuperar materiales y herramientas, utilizando anaqueles, silos y apiladoras. En conjunto estas dos tecnologías pueden entregar y recibir materiales sin la intervención de la mano humana.

Por otro lado un ejemplo de un sub-sistema que trabaja bajo el modelo de Job Shop son las **Células de Manufactura**, las cuales buscan alcanzar el máximo aprovechamiento de la maquinaria y los equipos, reuniendo los productos que tengan características y necesidades de procesamiento similares en familias de productos y teniendo una fuerza laboral polivalente. Posteriormente, los equipos y las personas son agrupados, formando células de manufactura que satisfacen las necesidades de cada familia de productos e intentan mantener un flujo continuo de materiales.

Es común encontrar , que las Células de Manufactura tiene una correlación positiva entre el tiempo de alistamiento de las series de producción, el inventario de producto en proceso y el tiempo que los productos permanecen en el sistema productivo (Throughput), como lo menciona Garavelli (2001). Sin embargo, Jensen, Malhotra y Philipoom (1996) evidencian que dicha correlación no es tan directa, y que hay otros factores como por ejemplo la regla de secuenciación de las operaciones, la flexibilidad de las familias de productos, el tamaño de los lotes y el comportamiento de la demanda que también afectan la eficiencia de las Células de Manufactura.

De lo anterior se puede destacar que el sistema de producción Job-Shop se caracteriza por tener una elevada diferenciación de los productos para satisfacer diferentes necesidades de los clientes, para lograr esto las corporaciones por lo general sacrifican los indicadores de producción y el

lead time, y además deben contar con una fuerza de trabajo cualificada y polivalente, maquinaria multipropósito y fabricar tamaños de lotes muy pequeños o de a uno.

3.2.2 Personalización Masiva y Producción en Masa (Flow Shop)

La Personalización Masiva y Producción en Masa son paradigmas de producción, el primero busca satisfacer las necesidades de cada cliente del mercado y el segundo satisface necesidades de grandes segmentos de mercado.

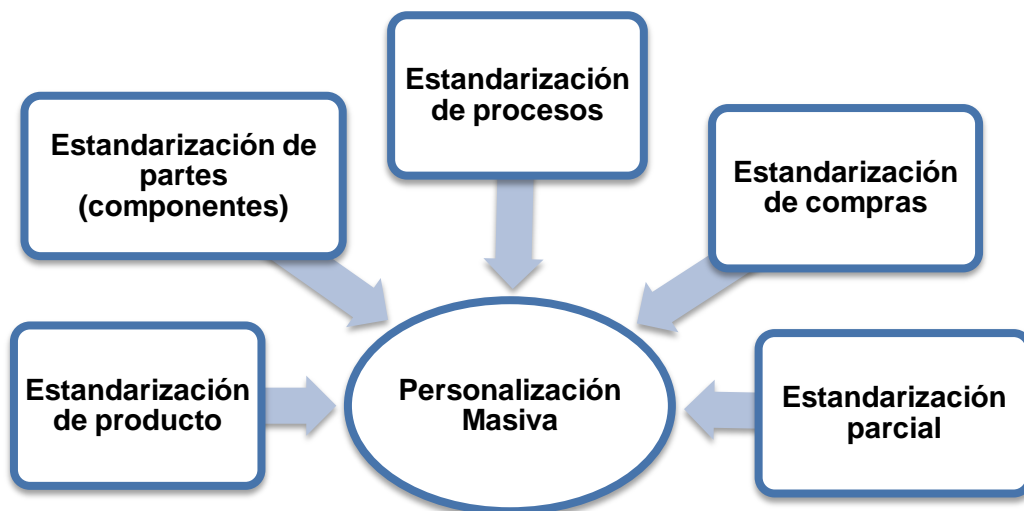
Por lo anterior, la Personalización Masiva se basa en una operación sistemática de ingeniería, la cual involucra la integración y optimización de productos, procesos, entornos de manufactura y grupos empresariales, [Gu et al (2002)] .La Producción en Masa fabrica productos técnicamente homogéneos, según Domínguez et al. (2005) “para la obtención de los productos homogéneos se deben ejecutar las mismas operaciones, en las mismas máquinas con una disposición en cadena o línea”.

La Producción en Masa se caracteriza por programar las tareas de la producción planificada durante un periodo de tiempo definido, dichas tareas se realizan en serie a través de la línea de producción y son llevadas a cabo por un conjunto de máquinas específicas que deben seguir características básicas como: realizar una sola tarea a la vez y para un único trabajo.

Da Silveira et al.(2001), exponen que la Personalización Masiva debe destacarse por tener una demanda de clientes variables, unas condiciones de mercado apropiadas, productos adaptables a este ambiente y una tecnología que permita la adaptabilidad de los requerimientos.

Sin embargo, Selladurai (2004), indica que los métodos para lograr una Personalización Masiva son los mostrados en la Figura 3.

Figura 3. Métodos para lograr la personalización masiva



Fuente: Selladurai (2004)

La figura 3, señala las características operativas dominantes que facilitan llegar a una Personalización Masiva, las cuales ayudan a la empresa a presentar una reducción de los costos en economías de escala y la disminución de los inventarios, contribuyendo así a tener un mayor control sobre la previsión de las necesidades. La Personalización Masiva se facilita a través del uso de la estandarización de procesos, debido a que estos conllevan a un mayor manejo de los requerimientos del cliente, donde un ejemplo de ello es Hewlett-Packard, que añade algunos componentes personalizados, tales como manuales, fuentes de alimentación para las impresoras etc.

Mientras la Producción en Masa, es un paradigma que se destaca por utilizar las mismas máquinas para un lote y los fabricantes luchan por satisfacer los deseos y las necesidades de sus clientes sin sacrificar la eficiencia y los beneficios obtenidos a través de la producción masiva, la Personalización Masiva según, Helms et al.(2008), se destaca por ajustarse a la nueva tecnología donde aumenta la viabilidad de las estrategias de personalización, permitiendo así integrar la información a medida y realizar cambios de patrones según sea necesario, sin el permanente cambio del patrón original.

Según McCarthy, Brabazon y Bramham (2003), un procedimiento lógico en la producción de bienes con una estrategia de Personalización Masiva, es el siguiente:

- **Toma de orden y la coordinación:** Este proceso se encarga de la administración del diálogo con los clientes. De recibir e interpretar los deseos del mismo, codificar estos para generar la verificación del pedido, la búsqueda de una solución del producto para el cliente y la generación de los detalles de la solicitud.
- **El desarrollo del producto y diseño:** Este proceso se encarga de diseñar el producto para el cliente. Cumpliendo con los estándares internos como externos que se encuentra dentro de su ámbito de aplicación.
- **Validación del producto y la ingeniería de fabricación:** Este proceso es responsable de confirmar la posibilidad de fabricar el diseño y su traducción en un conjunto de procesos de fabricación y normas. Por lo general genera la lista de materiales para los productos a medida y ofrece directrices sobre la ruta y el procesamiento de instrucciones.
- **Gestión de pedidos:** Este proceso se encarga de darle un valor a los pedidos, los cuales pueden ser incluidos a la cadena de suministro. Este además interactúa con el proceso para la coordinación de la orden, informando cuando puede completar el programa de una orden y también controla las actividades para el cumplimiento de la misma.
- **Realización de pedido:** Este proceso abarca las actividades realizadas en la fabricación de productos, e incluye actividades de proveedores, procesos internos de producción y actividades de entrega.
- **Proceso de post-orden:** Se trata de actividades que están después del cumplimiento de una orden, como el mantenimiento, los reclamos de garantía, asesoría técnica, etc.

Algunos ejemplos de sub-sistemas que trabajan bajo el modelo de Flow Shop es **Configuración por Lotes y la Configuración Continua**, el primero es aquel que utiliza las mismas instalaciones para la obtención de múltiples productos, donde una vez obtenida la cantidad deseada para uno de ellos, se procede a ajustar la instalación o instalaciones y a procesar otro lote de otro producto, [Domínguez et al. (2005)]. Y el segundo es un sub-sistema por medio del cual se obtiene un mismo producto en una instalación fija, para éste el ritmo de producción es acelerado y las operaciones se ejecutan sin interrupción; como el producto es el

mismo, el proceso de producción no sufre cambios seguidos y puede ser perfeccionado continuamente.

La configuración por Lotes se usa para fabricar una cantidad limitada de un producto por vez, requiriendo así que el trabajo relacionado con cualquier producto se divida en partes operacionales y que cada operación quede terminada para el lote completo antes de emprender la siguiente operación. Domínguez et al. (2005) expresa que esta configuración requiere operaciones más especializadas, por lo tanto los centros de trabajo requieren de equipos y maquinaria sofisticada y enfocada a cierto tipo de operaciones, generando así mayores inversiones de capital.

El proceso de producción por lotes, según Xuana y Tangb (2005) se encuentra asociado a dos tipos de lotes, lotes en serie y lotes en paralelo; los lotes en serie requieren de un número de operaciones, donde cada operación se procesa en una sola máquina, una tras otra sucesivamente, mientras que los lotes en paralelo están relacionados con un conjunto de operaciones que pasan por una máquina, y son procesados al mismo tiempo.

Por otra parte Domínguez et al. (2005) también destaca la existencia de una alta homogeneidad del proceso y alta repetitividad de las operaciones cuando se fabrican bienes o servicios en una Configuración Continua. Normalmente para que un trabajo fluya libremente en una Configuración Continua los tiempos de ejecución de cada operación deben ser iguales, si aparecen algunas operaciones con una mayor capacidad de procesamiento que otras se generarán ineficiencias en el sistema, porque éste trabajará a la velocidad de la operación más lenta, lo cual va en contra de los principios básico del estudio del trabajo que son la eliminación de los tiempos ociosos y de las esperas.

En este sentido Domínguez et al. (2005) define como objetivos de la Configuración Continúa la mejora del flujo de materiales y del trabajo, la especialización de los conocimientos y destrezas de los trabajadores, rápida realización de los trabajos y rápida generación de valor agregado.

Las empresas y el mercado deben tener las siguientes características con el fin de aplicar la Configuración Continua con eficiencia [Domínguez et al. (2005)]:

- **Demanda uniforme:** Se necesita de ella porque al presentar un descenso imprevisto y al tiempo no se cambiara o modificara el plan de producción, se

podría llegar a una acumulación no deseada de productos terminados, lo cual conllevaría a generar problemas de almacenamiento e incremento en el capital de trabajo. Por lo anterior las empresas que trabajan este tipo de producción, intentan estabilizar su plan de producción fabricando para inventario durante las etapas de menor demanda.

- **Productos, servicio o trabajo estandarizado:** Al ser la Configuración Continua rígida o inflexible, no permite modificaciones en la gama de los productos. Donde la diversidad de estos solo puede realizarse en los acabados, decoración y pequeños detalles.
- **Materiales ajustados a las especificaciones y entregas a tiempo:** La Configuración Continua al ser un proceso poco flexible no permite que los materiales que deben ser procesados sean variables, por ende el retraso de estos en su tiempo de abastecimiento tienen efectos negativos, ya que obstruye en el flujo toda la cadena de suministro.
- **Todas las operaciones referentes a la realización de un trabajo deben ser detalladas y definidas:** Las operaciones deben ajustarse siempre del mismo modo y en el mismo tiempo, para así lograr un flujo de proceso equilibrado.
- **Mantenimiento preventivo:** Se debe realizar para que en el procesos no se presenten paros por averías en los equipos, lo cual conllevaría a pérdidas del tiempo y un consecuente aumento en los ciclo de producción.
- **Todas las etapas deben estar equilibradas:** Se necesita efectuar una detenida planificación previa al comienzo de las operaciones, igualar la duración de las mismas y, en particular, gestionar la llegada de los materiales en las fechas estipuladas, con la calidad requerida y en las cantidades justas, para hacer más eficiente el flujo de los materiales.

A cerca de los dos sub-sistemas de Producción en Masa expuestos anteriormente se puede concluir según Domínguez et al. (2005) que la Configuración Continua presenta ventajas sobre la Configuración por Lote en cuanto al contenido de trabajo, de esta manera la Configuración Continua puede llegar a reducir costos como por ejemplo los de mano de obra, ya que una planificación adecuada y detallada permite obtener ahorros en los tiempos; otra ventaja que tiene la Configuración Continua frente la Configuración por Lotes es la posibilidad de tener un correcto diseño de las tareas y del producto desde el inicio, y así la

reproducibilidad y la precisión serán mayores, lo cual potencia el control estadístico de calidad.

Por otro lado, un ejemplo de un sub-sistema de la Personalización Masiva es la **Sistema de Manufactura Flexible (Flexible Manufacturing System, FMS)**, donde Krajewski y Ritzman (2000), la definen como una configuración de estaciones casi independientes, controladas por computadora, en la cual el manejo de materiales y la carga de las máquinas se realizan en forma automática. Donde un SMF al ser un sistema de automatización flexible se basa en la automatización programable de máquinas NC (Máquinas Controladas Numéricamente) y CNC (Máquinas Con Control Numérico Computarizado). Los ajustes de los programas y herramientas pueden realizarse casi sin perder tiempo de producción cuando se pasa de fabricación de un producto al siguiente.

Los objetivos principales que se trata de alcanzar con la implementación de un SFM son sincronizar las actividades y maximizar la utilización del sistema, estos objetivos son cercanos a este sub-sistema puesto que la automatización permite cambiar rápidamente de herramientas y los tiempos de preparación de las máquinas son cortos. [Krajewski y Ritzman (2000)]. Los SFM también se caracterizan por:

- Una marcada tendencia en la reducción de los costos de fabricación: Al eliminar operaciones innecesarias, transporte materiales y producto terminado, desperdicio de materiales y disminución efectiva de piezas defectuosas.
- Un incremento sustancial de los indicadores de Productividad: Al incrementar los volúmenes de fabricación significativamente.
- Un grado significativo de Calidad del producto terminado.
- Mejora el grado de satisfacción del cliente: al proporcionársele un producto de alta calidad y en tiempo.
- Reduce significativamente el espacio necesario o área de trabajo necesaria para la operación de equipo y maquinaria.
- Puede llevarse fácilmente al sistema JIT (Justo a tiempo): Permite eliminar o disminuir significativamente las áreas de almacenamiento de producto terminado y materias primas.

Por último, para el funcionamiento de las operaciones básicas de un sistema SMF se puede decir que necesita de tres componentes los cuales son : **1)** varias estaciones de trabajo controladas por computador, como las máquinas CNC o los robots, que realizan serie de operaciones, **2)** un sistema de transporte controlado por computador, para llevar partes y materiales de una a otra máquina, e introducirlos y sacarlos del sistema ,**3)** presentar estaciones para carga y descarga.[Krajewski y Ritzman (2000)].

4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y OPERATIVAS DE LAS REDES DE PETRI.

4.1 Aspectos Generales

Las Redes de Petri fueron desarrolladas por Carl Adam Petri en 1962, desde ese entonces el uso y el estudio de las Redes de Petri ha crecido notablemente.

Según Petri (1962) estas redes permiten representar de forma natural un modelo de eventos discretos, por tal razón han sido propuestas para una gran variedad de aplicaciones en diferentes campos, como por ejemplo para modelar y analizar sistemas de memorias con múltiples procesadores, sistemas de control industrial, sistemas de flujos de datos computacionales, circuitos y estructuras asincrónicas, redes neuronales y modelos para toma de decisiones,[Murata (1989)]

Según Guasch (2005), los modelos de eventos discretos, además de ser discretos son modelos dinámicos y estocásticos, en los que las propiedades de interés (variables de estado) cambian de valor en instantes no periódicos de tiempo, sin estar dirigidos por un reloj. Estos instantes de tiempo se corresponden con la ocurrencia de un evento, por tanto un evento se define como una acción instantánea que puede cambiar el estado del modelo. También define una actividad como el elemento de un modelo de eventos discretos donde se encapsula lo que sucede entre dos eventos, dichas actividades generalmente tiene duración temporal y, normalmente, precisan del uso de recursos.

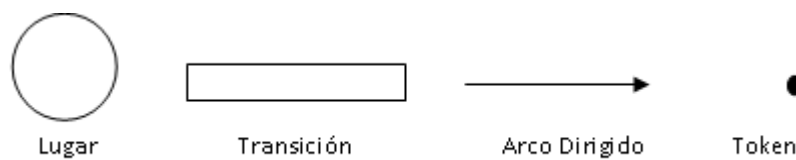
Una Red de Petri es una clase de grafo dirigido, ponderado, bipartito que consiste en dos clases de nodos llamados lugares y transiciones. En un modelo de eventos discretos un lugar se asocia con una actividad y una transición se asocia con un evento [Universidad de Huelva (2009)].

Los lugares y las transiciones están unidos por arcos dirigidos, los cuales pueden unir una transición con un lugar y viceversa, (Murata, 1989; Guasch, 2005; van der Aalst, 1996), pero no pueden unir dos nodos del mismo tipo. Estos arcos están etiquetados con sus correspondientes pesos (enteros positivos), donde un arco con peso w se interpreta como un conjunto de w arcos en paralelo, que conectan un mismo lugar y una misma transición, [Murata (1989)], este peso permite describir las condiciones necesarias para que la transición pueda activarse, [Guasch (2005)].

Según Murata (1989) al activarse una transición se asigna a un lugar p un entero no negativo k , en este caso se dice que el lugar p está marcado con k tokens. Generalmente los *tokens* representan el número de elementos que hay en una cola de espera y van en el interior de un nodo de lugar, [Guasch (2005)].

Al momento de representar gráficamente una Red de Petri los nodos de lugar se representan con un círculo, los nodos de transición con barras o cajas, los arcos dirigidos se dibujan con flechas y los tokens se representan con puntos negros:

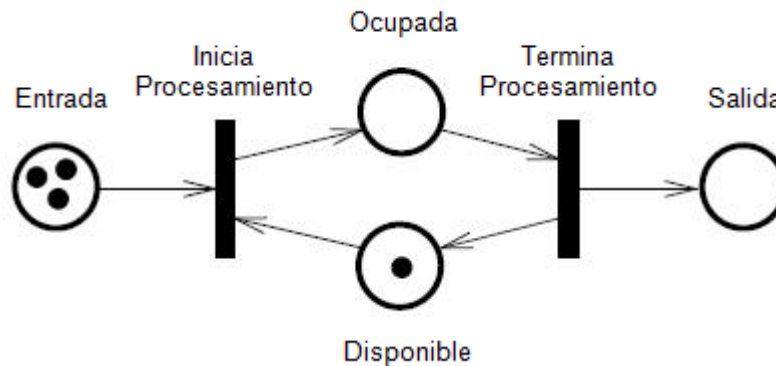
Figura 4. Representación gráfica de los elementos de una Red de Petri



Fuente: Autores

La figura 5 ilustra un modelo de Redes de Petri clásico. Esta Red de Petri modela una máquina la cual procesa tareas y tiene dos estados (disponibles y ocupados).

Figura 5. Red de Petri que representa una máquina.



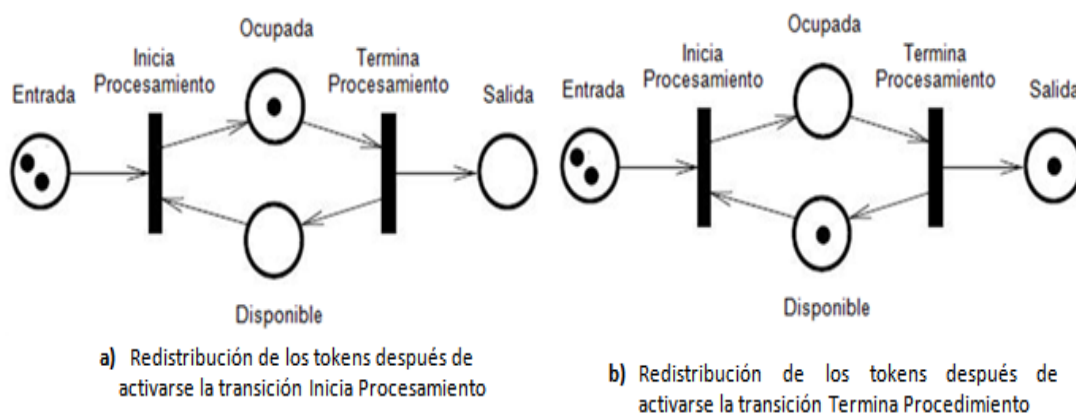
Fuente: van der Aalst (1996)

En la figura 5, se presentan cuatro lugares (entrada, disponible, ocupada y salida) y dos transiciones (Inicia Procesamiento y Termina Procesamiento). En el estado que muestra la figura 5 hay cuatro tokens; tres en el lugar entrada y uno en el lugar disponible. Los tokens en el lugar entrada indica el número de tareas a ser procesadas por la máquina. El token en el lugar disponible indica que la máquina

está disponible y lista para procesar una tarea. Si la máquina está procesando una tarea entonces no hay token en el lugar Disponible y hay un token en el lugar Ocupada. Los tokens en el lugar Salida representan las tareas que han sido procesadas en la máquina.

Mientras tanto, en la figura 6, se presentan las siguientes características, en la marcación inicial de la figura 6b no se cumplen las condiciones necesarias para que la transición Termina Procesamiento se active porque no hay tokens en el lugar Ocupada, pero sí se cumplen las condiciones para que la transición Inicia Procesamiento se active, ya que hay un token en el lugar Entrada y un token en el lugar Disponible. Al momento de activarse la transición Inicia Procesamiento, se consume un token del lugar Entrada y un token del lugar Disponible, además se produce un token en el lugar Ocupada, tal como se muestra en la figura 6a.

Figura 6. Red de Petri que representa una máquina después de ser activadas las transiciones.



Fuente: van der Aalst (1996)

En el estado que muestra la figura 6a, únicamente la transición Termina Procesamiento se puede activar, en consecuencia el token del lugar Ocupada se consume y se producen dos tokens, uno va al lugar Salida y el otro va al lugar Disponible, como se observa en la figura 6b.

Según Guasch (2005), matemáticamente, una Red de Petri se puede definir a partir de la siguiente tupla de cinco elementos:

$$\text{Red de Petri} = (P, T, A, W, M_0)$$

Donde el significado de cada una de las siglas utilizadas es el siguiente:

El estado del sistema queda totalmente determinado por el número de marcas en cada nodo tipo lugar, y puede describirse matemáticamente por el vector P .

El comportamiento dinámico del ejemplo expuesto en las figura 6a y 6b, y en general el comportamiento de dinámico de cualquier Red de Petri se puede simular con las siguientes reglas expuesta por Guasch (2005):

- Una transición T_i está activada si cada uno de los lugares P_j conectados a la entrada contienen al menos $W(P_j, T_i)$ tokens. $W(P_j, T_i)$ representa el peso del arco que une el nodo P_j con la transición T_i (si en un arco no aparece su peso, se supone que es 1). De forma resumida una transición esta activada si:

Donde $M(P_j)$ es el número de tokens en el lugar P_j y $E(T_i)$ es el conjunto de lugares de entrada a la transición T_i

- Una transición puede activarse en cualquier momento.
- Como resultado de activarse una transición, se eliminan $W(P_j, T_i)$ tokens de cada nodo P_j a la entrada de T_i y se añaden $W(T_i, P_k)$ a cada nodo P_k de salida de T_i .

Las Redes de Petri ordinarias no tienen la capacidad de asociar a cada token un conjunto de atributos y por tanto no facilitan la descripción de aquellas transiciones cuyo comportamiento depende del estado de los tokens; para brindar mayor flexibilidad a las redes se han propuesto muchas extensiones que facilitan la modelación de sistemas complejos. Las extensiones típicas de las Redes de Petri son la agregación de “Color”, “Tiempo” y “Jerarquía”

4.1.1 Redes de Petri Coloreadas

Las Redes de Petri Coloreadas permiten reducir la dimensión de un modelo construido con Redes de Petri ordinarias, al incrementar el nivel de abstracción y al permitir que los tokens tengan asociadas información que se denominan Colores (equivalen al concepto atributo), [Guasch (2005)].

En general, son muchas las situaciones en las que es necesario diferenciar los tokens que fluyen en la red. En este sentido las Redes Petri Coloreadas permiten formalizar tanto las características de los objetos que fluyen en el sistema, como las propiedades que deben tener para que un cierto evento pueda suceder. Ejemplo de los atributos asociados a un token que debe ir avanzando en las diferentes etapas del proceso productivo, pueden ser: tiempo de llegada al sistema, fecha de entrega al cliente, prioridad, forma, etc.

Matemáticamente, una Red de Petri Coloreada puede definirse a partir de la siguiente tupla, [Jensen (1997)]:

$$\text{Red de Petri Coloreada} = (, P, T, A, N, C, G, E, I)$$

Donde:

A continuación se muestra un ejemplo de la modelación de un proceso con Redes de Petri Coloreadas y con Redes de Petri clásicas expuesto por Guasch (2005):

Proceso Productivo: Considérese un sistema de producción integrado por cuatro máquinas, M_1 , M_2 , M_3 , M_4 , que representan las operaciones de fresado, perforación, erosión y ensamblado respectivamente, en dicho sistema fluyen indistintamente dos tipos de piezas (A: Piezas de Cobre y B: Piezas de Acero), sobre las cuales se deben realizar las tres primeras operaciones (fresado, perforación y erosión), en la misma secuencia, pero el tiempo de operación dependerá de si se trata de una pieza de cobre o de acero, para la última operación (ensamblado) es necesario disponer de una pieza de acero y una de cobre. Cada máquina tiene un almacén local donde se depositan las piezas procesadas, el sistema también cuenta con un almacén de materias primas y otro almacén de producto terminado. Se ha considerado como hipótesis de trabajo que una máquina puede pasar de procesar una pieza de acero a una de cobre, o viceversa, sin que ello repercuta en un incremento del tiempo de alistamiento. Además, no se incluye en la Red de Petri el tiempo de procesamiento. Por otro lado, con el objetivo de facilitar el modelado del sistema con una Red de Petri Coloreada, tampoco se consideran los estados de máquina trabajando ni máquina ocupada, ni el concepto de arcos inhibitorios.

Tabla 2. Transiciones Redes de Petri Clásica y Coloreada

TRANSICIONES	
Red de Petri Clásica	Red de Petri Coloreada
T1: Fresado sobre una pieza de acero.	T1: Fresado sobre una pieza.
T2: Perforación sobre una pieza de acero.	T2: Perforación sobre una pieza.
T3: Erosión sobre una pieza de acero.	T3: Erosión sobre una pieza.
T4: Ensamblado de una pieza de acero con una de cobre.	T4: Ensamblado de una pieza de acero con una de cobre.
T5: Fresado sobre una pieza de cobre.	
T6: Perforación sobre una pieza	

de cobre.	
T7: Erosión sobre una pieza de cobre.	

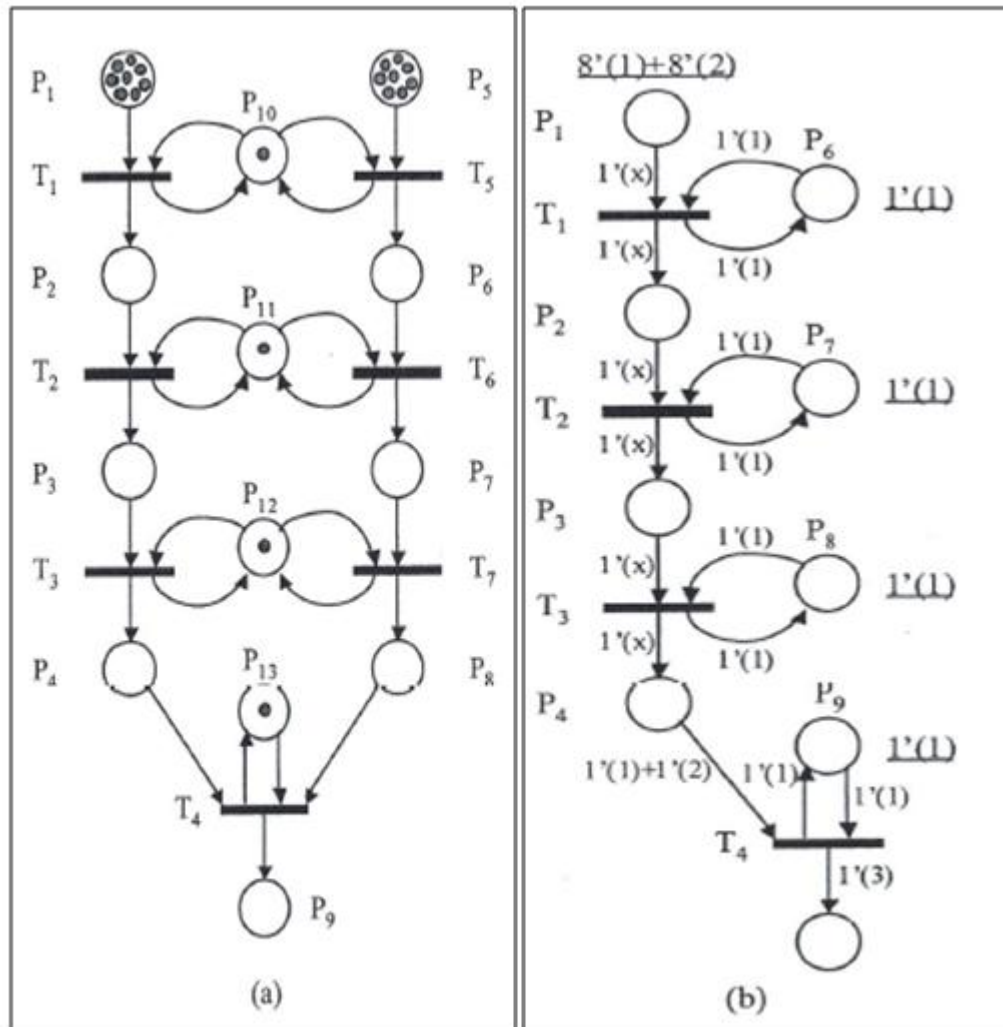
Fuente: Guasch (2005)

Tabla 3. Lugares Redes de Petri Clásica y Coloreada

NODOS DE LUGAR	
Red de Petri Clásica	Red de Petri Coloreada
P1: Almacén de piezas de acero.	P1: Almacén de piezas.
P2: Piezas de acero fresadas.	P2: Piezas de fresadas.
P3: Piezas de acero perforadas.	P3: Piezas perforadas.
P4: Piezas de acero erosionadas.	P4: Piezas erosionadas.
P5: Almacén de piezas de cobre.	P5: Piezas ensambladas.
P6: Piezas de cobre fresadas.	P6: Máquina fresadora libre.
P7: Piezas de cobre perforadas.	P7: Máquina perforada libre.
P8: Piezas de cobre erosionadas.	P8: Máquina erosionadora libre.
P9: Piezas ensambladas.	P9: Máquina ensambladora libre.
P10: Máquina fresadora libre.	
P11: Máquina perforada libre.	
P12: Máquina erosionadora libre.	
P13: Máquina ensambladora libre.	

Fuente: Guasch (2005)

Figura 7. Red de Petri Clásica y Red de Petri Coloreada de una secuencia de tareas sobre dos tipos diferentes de piezas.



a. Imagen Red de Petri Clásica

b. Imagen Red de Petri Coloreada

Fuente: Guasch (2005)

En el ejemplo descrito, puede observarse que la Red de Petri Clásica que describe el flujo de piezas del tipo cobre es la misma que describe el flujo de piezas de tipo acero. A pesar de ello, es necesario definir explícitamente ambas redes para poder diferenciar el tipo de pieza que se encuentra almacenada en cada cola de la máquina de ensamblado. Esta información es imprescindible para poder garantizar que se realizará una operación de ensamblado entre dos piezas del mismo tipo. La Red Petri Coloreada no necesitan esta definición explícita porque los colores

de cada token contienen la información del tipo de pieza, adicionalmente el peso del arco que une el lugar cuatro (P4) con la transición cuatro (T4) condiciona la activación de dicha transición, hasta el momento en que hayan dos tipos diferentes de tokens en el lugar P4 (Uno que representa una pieza de cobre erosionada y el otro que representa una pieza de acero erosionada).

A continuación se explicará más detalladamente los componentes nuevos que aparecen en la Red de Petri Coloreada expuesta en la figura 7b.

Las expresiones $8'(1)+8'(2)$ y $1'(1)$ que se encuentran al lado de los lugares P1, P6, P7, P8 y P9 son formalismos que determinan el número inicial de tokens en dicho lugares y los valores de los colores de los objetos. El lugar P1 tiene como conjunto de colores C (P1)=C1 (un único color que indica el tipo de pieza: C1=1 Cobre; C1=2 Acero); la función de inicialización del lugar P1 se interpreta como 8 piezas de cobre (C1=1) y 8 piezas de acero (C1=2). Todo el conjunto de expresiones permite obtener la marcación inicial M_0 .

En general todas las expresiones de inicialización se representan de la siguiente forma:

Donde:

n: número de objetos con los valores de los colores descritos dentro del paréntesis
C_i: valor del color i

Las expresiones $1'(x)$, $1'(1)+1'(2)$ y $1'(3)^2$ que se encuentra al lado de los arcos consisten en la formalización de restricciones entre los colores de los distintos objetos de los nodos lugar conectados a la entrada de la transición, para los cuales pueden utilizarse variables como por ejemplo $1'(x)$, una vez estas variables toman valores concretos de colores fuerzan a una selección de aquellos objetos cuyos valores coincidan con los valores que hayan tomado las variables. En el caso que no exista ningún objeto que cumpla las restricciones descritas por las expresiones de arco, entonces la transición no se encontrara activada. Por ejemplo para activar la transición T4 es necesario que en el lugar P4 exista como mínimo una pieza de cobre ($1'(1)$) y una pieza de acero ($1'(2)$), por tanto la expresión queda de la siguiente forma $1'(1)+1'(2)$.

² Pieza ensamblada

4.1.2 Redes de Petri con Tiempo

En los sistemas reales con frecuencia es importante describir el comportamiento temporal del sistema, por ejemplo para modelar los tiempos de procesamiento y demoras. Según van der Aalst (1996) las Redes de Petri Clásicas no son capaces de manejar cuantitativamente el tiempo, pero hay varias maneras de introducir el tiempo en una Red de Petri Clásica, y uno de los mecanismos de sincronización de una red es asociar los tiempos con tokens y las transiciones determinan las demoras.

Según van der Aalst (1996) cada token tiene una marca de tiempo la cual modela el tiempo a partir del cual el token estará disponible para su utilización. En este sentido una transición se activa en el momento en que todos sus lugares de entrada contienen los tokens suficientes para su activación y estos están disponibles según la marca de tiempo. La marca de tiempo de un token producido es igual al tiempo que se tarda una transición en habilitarse más el tiempo que se demora una transición en ejecutarse. Considere la figura 5 (La primera figura de una Red de Petri en este capítulo). Si el lugar Entrada contiene un token con marca de tiempo 1 y el lugar Disponible contiene un token con marca de tiempo 0, entonces la transición Inicia Procesamiento se activará en cuanto transcurra una unidad de tiempo. Si la transición Inicia Procesamiento se tarda en ejecutar tres unidades de tiempo, entonces el token producido para el lugar Ocupada tiene una marca de tiempo igual $1+3=4$.

Matemáticamente, una Red de Petri con Tiempo puede definirse a partir de la siguiente tupla, [van der Aalst (1996)] :

$$\text{Red de Petri con Tiempo} = (P, T, A, N, TS, D)$$

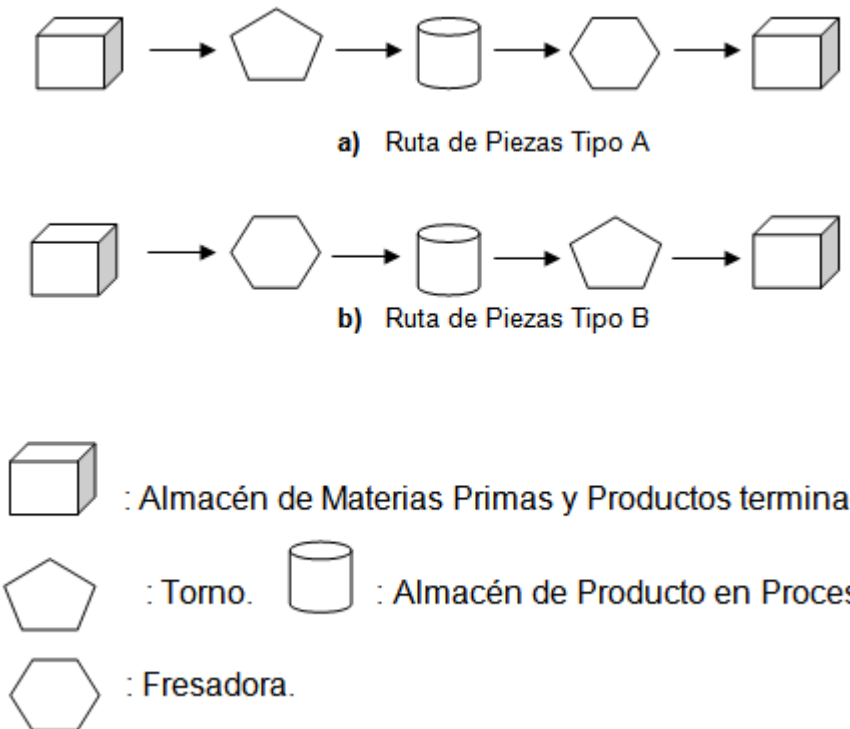
Como se puede observar el tiempo puede ser adicionado como un color en una Red de Petri Coloreada, además las reglas de las Redes de Petri Clásicas

también aplican para las Redes de Petri con Tiempo, por lo cual no se profundizará en el estudio de este tipo de redes.

Por último se puede observar un caso expuesto por Li-Chih (1998) en el cual describe paso a paso como un Sistema de Manufactura Automatizado puede ser modelado con una Red de Petri, la cual integra Redes de Petri Orientadas a Objetos, Redes de Petri Temporizadas y Redes de Petri Coloreadas.

El Sistema de Manufactura Automatizado consta de un Torno, una Fresadora, un almacén de Materias Primas y Productos Terminados, un almacén de Producto en Proceso y de un Robot que transporta los materiales entre los recursos mencionados anteriormente; se procesan dos tipos de diferentes de piezas, las piezas tipo A y las tipo B, las rutas de procesamiento de las piezas se muestran en la figura 8.

Figura 8. Ruta de procesamiento de las Piezas Tipo A y B.



Fuente: Autores

Cada uno de los recursos del sistema (Almacén de Materias Primas y Productos Terminados, Torno, Fresadora y el Almacén de Producto en Proceso) tiene

asociado una Red de Petri Coloreada y Temporizada, y en el caso del Robot la red que lo representa se muestra en la figura 7. Estas Redes de Petri y sus interrelaciones son consideradas objetos y transiciones, respectivamente.

La última etapa en la construcción de la red es la detección y eliminación de bloqueos, los bloqueos en la red pueden detener la operación del sistema y pueden afectar el rendimiento del mismo en términos de Tiempo de Ciclo, Inventario de Producto en Proceso, Utilización de las máquinas y cumplimiento de las Fechas de entrega. Li-Chih y Shao-Ying (1998) ejecutan un algoritmo para detectar bloqueos en Redes de Petri Orientadas a Objetos, Coloreadas y Temporizadas, el cual que es una combinación de los métodos propuestos por D'souza (1994) y David y Alla (1992).

Al final se concluye que el comportamiento dinámico de un Sistema de Manufactura Automatizado y de sus sub-sistemas puede ser modelado, analizado, programado y controlado de una manera detalla con una Red de Petri Orientada a Objetos, Coloreada y Temporizada.

4.2 Herramientas computacionales para simular Redes de Petri.

Para toda compañía es importante prever el comportamiento de los proyectos, procesos productivos o administrativos que son propios de la misma, con el objetivo de identificar las ventajas y desventajas a las cuales se enfrentan. Para ello necesitan de herramientas que brinden la posibilidad de alcanzar este objetivo, la simulación es una de estas herramientas, la cual ha sido utilizada amplia y exitosamente tanto en el sector académico como en el industrial.

Hoy en día, la creación de simuladores ha ayudado a que la simulación sea de fácil aplicación en muchos ambientes, ya que cuentan con opciones que permiten modelar una gran variedad de procesos, lo que hace que el tiempo de modelación se reduzca notablemente en las compañías. [Rodríguez (2006)] .

Algunos software que son utilizados para simular eventos discretos como los procesos productivos de una industria manufacturera por medio de Redes de Petri son: Arena, Witness, Promodel, Flexsim, SIMFACTORY II.5, XCELL+, ProModelPC, AutoMod,Pnetlab , Woped., Microsoft Excel ®

Rodríguez (2006), considera que los simuladores más apropiados para una investigación o uso industrial son:

Tabla 4. Simuladores apropiados para investigación e uso industrial

Educación	Modelado rápido- Industria	Detallado complejo- Industria e investigación
1. XCELL+	1. SIMFACTORY II.5	1. WITNESS
2. SIMFACTORY II.5	2. XCELL+	2. AUTOMOD II
3. INSTRATA	3. INSTRATA	3. PromodelPC
4. WITNESS	4. PromodelPC	4. INSTRATA
5. PromodelPC	5. WITNESS	5. SIMFACTORY II.5
6. AUTOMOD II	6. AUTOMOD II	6. XCELL+
7.ARENA	7. FLEXSIIM	7.ARENA
		8. PNETLAB
		9.WOPED
		10.MICROSOFT EXCEL ®

Fuente: Rodríguez Rodríguez (2006) y Autores

Por otro lado, también existen lenguajes que permiten la simulación de estos eventos tales como: visual BASIC y Java.

A continuación se presentan características operativas y técnicas de algunos simuladores como por ejemplo Arena, Witness y Microsoft Excel ®, con el fin de mostrar la variedad de opciones con las cuales se puede representar computacionalmente las Redes de Petri. Con esto queda demostrado que la flexibilidad es la ventaja más importantes de las Redes de Petri frente a otros métodos de simulación.

4.2.1 Simulador Arena

Arena es una herramienta de simulación orientada a procesos, la cual permite una descripción detallada sobre el desarrollo del sistema que fluye a través de ella, ésta herramienta fue desarrollada por ROCKWELL SOFTWARE, la cual ha sido de gran utilización en la industria y la academia; [Kelton et al. (2004)]. Este simulador maneja un lenguaje de programación SIMAN [Tayfur y Melamed (2007)], el cual se encuentra diseñado para brindar apoyo en áreas tales como manufactura, logística, servicio al cliente, etc.

Por otro lado, ofrece una mejor representación del sistema, donde automáticamente elabora diferentes análisis del comportamiento, y combina ventajas de otros simuladores de alto nivel, con la flexibilidad de lenguajes como, Visual Basic y Java

Cuando se enlazan las simulaciones, Arena recopila de forma automática, estadísticas sobre los distintos elementos del modelo, entre las que se puede destacar las de recursos y colas. De los recursos obtiene de forma automática, el porcentaje de utilización, el número total de veces que se han usado durante la simulación y el número de unidades puestas en juego. De las colas obtiene los tiempos mínimos, medios y máximos de espera; el número mínimo, máximo y promedio de entidades esperando. También admite que el usuario pueda definir estudios estadísticos. [Gil (2006)]

Además, Arena y la simulación de eventos discretos permite fácilmente representar el proceso estocástico (variable y aleatorio). Esto permite emular el comportamiento de un verdadero sistema utilizando distribuciones estadísticas que los procesos y sistemas han demostrado para imitar la curva de su distribución. La simulación puede entonces crear eventos en el sistema (por ejemplo, la llegada de los clientes, eventos de error, etc.) o la duración de un evento determinado (por ejemplo, el tiempo de proceso, la falta de inactividad, etc.). Estos eventos son a continuación, "programados", permitiendo mirar como el sistema funciona con el tiempo. El poder de la simulación permite representar estas interacciones de los eventos y evaluar que efecto traen en el rendimiento real del sistema (Pág. Oficial Simulador Arena)

Como desventaja se puede decir que Arena carece de funcionalidad estadística. Para personalizar análisis estadísticos más complejos se debe exportar la información a otro programa. Aunque dada la gran interacción existente entre Arena y los productos Microsoft es fácil la manipulación de datos con análisis estadísticos rigurosos.

4.2.2 Simulador Witness

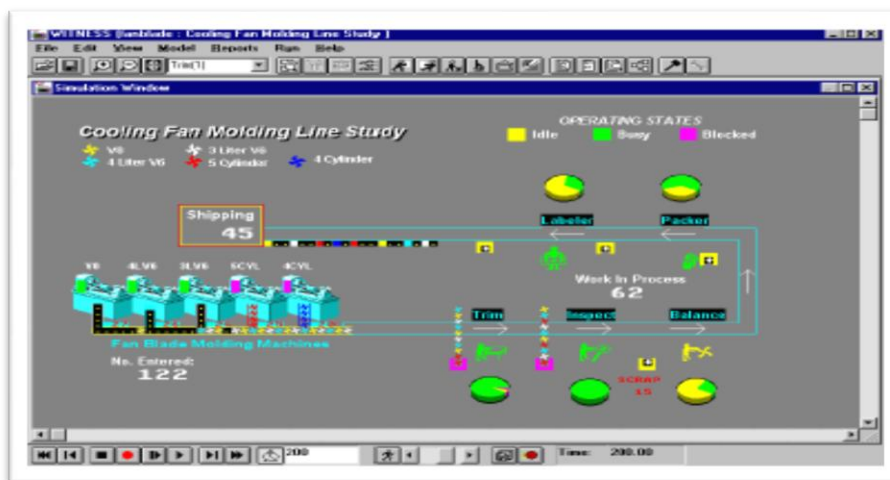
Esta herramienta es elaborada por Lanner Group, una firma líder a nivel mundial de productos de software en el campo de la simulación visual interactiva.

WITNESS usa la simulación de eventos discretos, el cual permite la representación de los procesos del mundo real en un modelo dinámico computarizado y permite experimentar distintos escenarios para identificar la solución óptima [Bouamra y Morrison (2000)]. Por otro lado, la simulación de eventos discretos funciona mediante el modelamiento de eventos individuales que se producen en intervalos de tiempo determinados, teniendo en cuenta los recursos, las restricciones y la manera en que estas interactúan. También incluye la variabilidad y aleatoriedad que se puede observar en la vida real.

Además, esta herramienta de simulación contiene una colección de iconos para representar los elementos, pero los usuarios también tienen la posibilidad de crear sus propios elementos. La simulación puede correrse en diferentes modos, desde paso a paso (step-by-step) a “lotes” de tiempo en el futuro. El flujo de elementos muestra el movimiento de las partes a través del modelo. La interfaz gráfica de la herramienta de simulación, es compatible con Windows.

Finalmente, son muchas las características de WITNESS que ayudan al análisis, por ejemplo los reportes estándar que comprenden una colección de estadísticas de un elemento que se pueden exportar en varios formatos e incluyendo un reporte estándar en tablas y gráficas. También, es posible crear series de tiempo, diagramas de torta, histogramas y tablas de reportes y expresiones en WITNESS.

Figura 9. Interfaz Witnes



Fuente: Law y Kelton (2000)

4.2.3 Microsoft Excel ®

Excel es un software, desarrollado y distribuido por Microsoft, el cual permite crear tablas, analizar datos y realizar cálculos. Además de ello, posibilita la creación de tablas que calculan de forma automática los totales de los valores numéricos específicos, imprimir tablas con diseños organizados y crear gráficos simples. Este software incluye Visual Basic para Aplicaciones (VBA), un lenguaje de programación basado en Visual Basic, que añade la capacidad para automatizar tareas en Excel y para proporcionar funciones definidas por el usuario para su uso en las hojas de cálculo.

Además, esta herramienta permite crear y hacer uso de las simulaciones y el diseñar y manejar macros las cuales posibilitan tanto a estudiantes, profesionales y empresas representar ideas intuitivas y los conceptos formales, permitiendo así desarrollar aplicaciones de mayor complejidad y automatizar tareas rutinarias.

4.3 Casos y análisis de algunas herramientas de simulación.

4.3.1 CASO1. Modelación, Análisis y simulación de un Sistema de Manufactura Flexible, utilizando la generación de Redes de Petri estocásticas y SIMAN/ARENA. [LEE (2004)]

Este caso tiene como objetivo principal el modelar y analizar un sistema de manufactura mediante Redes de Petri, así como simular el mismo por medio de las herramientas de simulación SIMAN/ ARENA.

El sistema de manufactura se encuentra conformado por una pieza la cual entra al sistema y espera el turno para ser procesada, esta pieza es realizada por una sola máquina. Después de que todas las piezas son fabricadas, estas son dirigidas a un puesto de trabajo 2, en la cual se realiza la inspección de todas las piezas fabricadas por la máquina. Además, en este centro de trabajo, las piezas fabricadas son clasificadas como buenas, malas y de reparación según corresponda.

Si la pieza es clasificada como buena sale del sistema, mientras si la pieza es clasificada como reparación todas las piezas son recicladas y son enviadas de nuevo a la máquina, para ser reprocesadas. Y finalmente si la pieza no cumple con los requerimientos es apartada del lote.

Este sistema de manufactura, maneja un tiempo de llegada de 9 minutos con distribución exponencial. Además cuenta con dos tipos de puesto de trabajo los tipo 1 que son el 30% y tipo 2 el 70%.

El trabajo tipo 1, presenta una mayor prioridad sobre el tipo 2. Mientras que el tipo 2 sigue el trabajo tipo 1. una vez se ha ordenado de acuerdo al orden de llegada. Cabe aclarar que si un trabajo tipo 2 se está realizando, y llega una orden tipo 1, no se interrumpe el proceso.

Las piezas que son reparables, regresan a la cola de la máquina pero estas presentan la prioridad más baja. Estos trabajos deben esperar detrás del orden de llegada de las piezas a realizar por el trabajo tipo 1 y 2, y se ordena de acuerdo con el momento en que vuelven a entrar en la cola. Este mismo esquema de prioridad se utiliza para la re-inspección de los puestos de trabajo adaptados. Así, hay tres distintas clases de prioridad, tanto en las colas de la máquina y el inspector: Tipo 1, Tipo 2, y Reparadora. La inspección de tiempo para cada pieza, es independientemente del tipo o el estado de repetición del trabajo, presentando así una distribución exponencial con un tiempo mínimo de 2 minutos.

De los trabajos inspeccionados en esta estación, el 80 por ciento están clasificados como buenos y salen del sistema, 10 por ciento se clasifican como rechazados y salen del sistema, y el otro 10 por ciento se clasifican como de reparación los cuales se devuelven a la cola de la máquina para la reanudación. Los mismos porcentajes se aplican a ambos tipos de la estación de inspección y se reciclan a través de la estación de mecanizado.

Como conclusión después de simular el sistema de manufactura con el Software SIMAN/Arena se obtiene que los resultados de la utilización de la máquina 1 y la máquina 2 por los tres métodos, presentan resultados similares pero, se admite que para las Redes de Petri estocásticas, el simulador permite únicamente la distribución exponencial, por lo que fue necesario transformar la distribución normal en exponencial. Sin embargo, para calcular el rendimiento de Redes de Petri estocásticas, es necesario generar todos los estados.

4.3.2 CASO2. Investigación sobre la modelación y simulación para mejorar la eficiencia para una empresa con ambiente de manufactura Job-Shop, [LI-CHIH, W. y SHAO-YING, W (1998)]

Este caso de modelación expuesto LI-CHIH y SHAO-YING, (1998) , se encarga de elaborar un modelo de simulación con Redes de Petri de una línea de producción de culatas³ para motores de automóviles en una compañía China, con el fin de analizar los cuellos de botella en la línea de producción, ajustar los recursos del sistema para cumplir con los requerimientos de producción y mejorar las eficiencias de los centros de trabajo.

El proceso de producción de una culata tiene cerca de sesenta y cuatro (64) operaciones, como por ejemplo fresado primario de la materia prima, fresado para refinar las curvas y la superficie, perforación y ampliación de orificios. Adicionalmente la línea de producción tiene veintiséis (26) centros de trabajo, dieciocho (18) trabajadores, con lo cual se producen 600 culatas por mes.

De acuerdo a la investigación llevada a cabo por los autores, la ociosidad de la mayoría de los equipos genera pérdida de tiempo y mala utilización de la mano de obra, por lo cual la eficiencia de la línea de producción es muy baja. En estas condiciones la empresa es incapaz de satisfacer la demanda mensual de culatas.

La primera mejora que proponen Cheng y Liu (2009) es una redistribución de los equipos y de los trabajadores en las tres etapas más importantes del proceso, con lo cual lograron una mejora en la producción mensual del 89%, ya que pasaron de producir 600 culatas mensuales a producir 1134 culatas mensuales.

Los autores Cheng y Liu (2009) utilizaron el software WITNESS para simular las Redes de Petri planteadas en el documento. Para simular y mejorar el sistema de producción de culatas los autores construyen la Red de Petri que representa al sistema en su estado original en el software WITNESS, adicionan los parámetros del proceso en el modelo, corren la simulación por primera vez, posteriormente se construye una Red de Petri la cual mejora el proceso original a partir del análisis de los datos obtenidos en la primera simulación (esta actividad se de repetir hasta que ya no sea no se posible mejorar el proceso). Para terminar se hace una última

³ La culata o tapa de cilindros es la parte superior de un motor de combustión interna, la cual permite el cierre hermético de la cámara de combustión.

simulación de la Red de Petri que representa la máxima mejora del sistema para recolectar y analizar los resultados.

Para finalizar el autor concluye que con la elaboración y mejoramiento de Redes de Petri en el software WITNESS el proceso alcanza una producción mensual 2592 culatas, mejorando 3,32 % la producción de la línea original, y sugiere dentro de los temas de estudio posteriores el análisis de líneas de producción flexible.

5. CASO ESTUDIO

El calzado es un artículo de vestir de suma importancia, debido a que es la parte de la indumentaria que permite tanto a hombres como mujeres proteger sus pies, Este adquiere muchas formas, como son los zapatos deportivos, las zapatillas, sandalias, alpargatas o botas, el caso motivo de estudio en este proyecto es una compañía dedicada específicamente a la elaboración de calzado para dama.

Adicionalmente, hay un calzado acorde a cada momento y su aceptación depende del gusto del cliente, por eso cumplir con los requerimientos de cada uno de ellos es de gran importancia para mantener la posición en el mercado, con este objetivo la compañía estudiada cuenta con diferentes opciones en cada uno de los elementos que componen el calzado, la combinación de todas estas características permite que los clientes tengan una amplia gama de productos terminados.

En este caso estudio se brindan opciones como por ejemplo diseño, talla, color del calzado, color de la suela, color de los hilos, broches, adornos y bisutería. Sin embargo, la compañía ha llegado a la conclusión que de todas estas opciones la única que afecta directamente el tiempo de una operación del proceso productivo es el tipo de diseño, específicamente el tiempo de corte del cuero; las demás operaciones mantienen sus tiempos promedios aritméticos y desviaciones estándar, independientemente de la elección del cliente.

Debido a que el tipo de diseño es la opción que genera variación en una de las operaciones del proceso productivo la compañía estudiada ha ejecutado trabajos acerca de ésta, en ellos se ha concluido que la compañía siempre ofrece veinticuatro (24) tipos de diseños diferentes, de los cuales la mitad varían significativamente los tiempos de procesamiento con respecto a la otra mitad, debido a esto se han agrupado doce (12) diseños en una familia que se llama "Diseño Rápido" y los doce (12) restantes se han agrupado en otra familia que se llama "Diseño Lento".

Al ahondar en el sistema productivo del caso estudio, se determina que el proceso de elaboración del calzado se caracteriza por tener operaciones de naturaleza discreta con restricciones de precedencia, lo cual permite que éstas se puedan agrupar según el proceso en una línea de producción. Adicionalmente las entradas del sistema y algunos parámetros del mismo tienen un comportamiento

estocástico (como por ejemplo los requerimientos del cliente y el tiempo de procesamiento en cada operación) lo cual hace que el sistema sea complejo.

Además, determinar el funcionamiento y las tendencias de la línea de producción es fundamental para encontrar y aprovechar las oportunidades de mejoramiento, para lograr esto se utilizarán las Redes de Petri porque permiten representar las características del caso estudio mencionadas anteriormente y se simulará en el Software Microsoft Excel ® del paquete de Office 2007 por ser una herramienta de bajo costo, muy utilizada por las compañías Colombianas y que tiene todas las herramientas necesarias para obtener y analizar los resultados de una simulación.

5.1 Características del Caso Estudio

5.1.1 Descripción Operaciones

- **Operación 1. Corte de Cuero:** La primera tarea de esta operación es hacer el control de calidad a los materiales que serán utilizados en el proceso de fabricación del calzado. Posteriormente un operario define los patrones de corte que se pueden llevar a cabo sobre las pieles según las tallas y modelos de los calzados que se vayan a fabricar y se realiza el corte del cuero.

Hay diferentes tipos de procedimientos para llevar a cabo el corte de las pieles, uno de ellos es el troquelado, éste por lo general se realiza con máquinas cortadoras automatizadas que minimizan el desperdicio según los patrones de corte. Otro tipo de procedimiento es el corte manual, en este caso el cortador debe tener mucha experticia y precisión. Generalmente para tener niveles de desperdicio bajos en este tipo de corte se debe empezar por los números de tallas mayores y dejar las tallas menores para el final.

Después de esto se debe disminuir el grosor del cuero cortado, esta tarea se lleva a cabo hasta niveles donde la piel además de tener alta resistencia, también es lo suficientemente flexible, lo cual facilita su procesamiento y permite que el zapato sea cómodo y durable.

Para terminar esta operación se debe realizar el corte del material que recubrirá la parte interna del zapato, este corte tiene las mismas características del corte de la piel, la diferencia entre los dos cortes es que se utilizan moldes o patrones distintos, aunque estas diferencias son mínimas.

- **Operación 2. Unión de piezas:** En esta operación todas aquellas piezas que fueron cortadas en la operación anterior son unidas, esta operación generalmente se realiza con máquinas cosedoras. El producto que se obtiene al final de esta operación es llamado corte.
- **Operación 3. Bisutería:** En esta operación un operario ensambla o coloca los diferentes accesorios que hacen parte del zapato como por ejemplo los broches, bandas elásticas, hebillas, botones y adornos.
- **Operación 4. Hormar:** La primera tarea en esta operación es seleccionar la horma del zapato de acuerdo a la talla de éste, la horma en pocas palabras es un molde hecho en materiales como madera o plástico que tiene la forma que va a tener el calzado.

Cuando se tiene la horma seleccionada se pone sobre ésta el ensamble que se elaboró en la operación anterior y se fija con clavos o grapas. Para que el ensamble adquiera la horma se debe someter a alta presión y a alta temperatura, este procedimiento es ejecutado por una máquina y es supervisado por un operario.

Luego de terminada esta tarea se procede a retirar las tachuelas o grapas utilizadas al inicio de la operación, sin separar el ensamble de la horma. Por último se desvanecen los bordes para dar un mejor acabado al calzado.

- **Operación 5. Ensuelado:** En esta operación se monta la suela en el ensamble el cual ya tiene la forma final, lo primero que se debe hacer es pulir las superficies de contacto tanto de la suela como del corte, para que el pegamento sea más fácil de manipular y para que los materiales absorban adecuadamente el pegamento.

Después de aplicar el pegamento se deben unir la suela y el corte, para posteriormente ser llevados a una prensa hidráulica o neumática, la cual los mantiene a una presión constante durante unos segundos hasta que la suela y el corte estén unidos firmemente. Por último se rebaja el excedente de pegamento y se pule la suela con una lija para dar un mejor acabado.

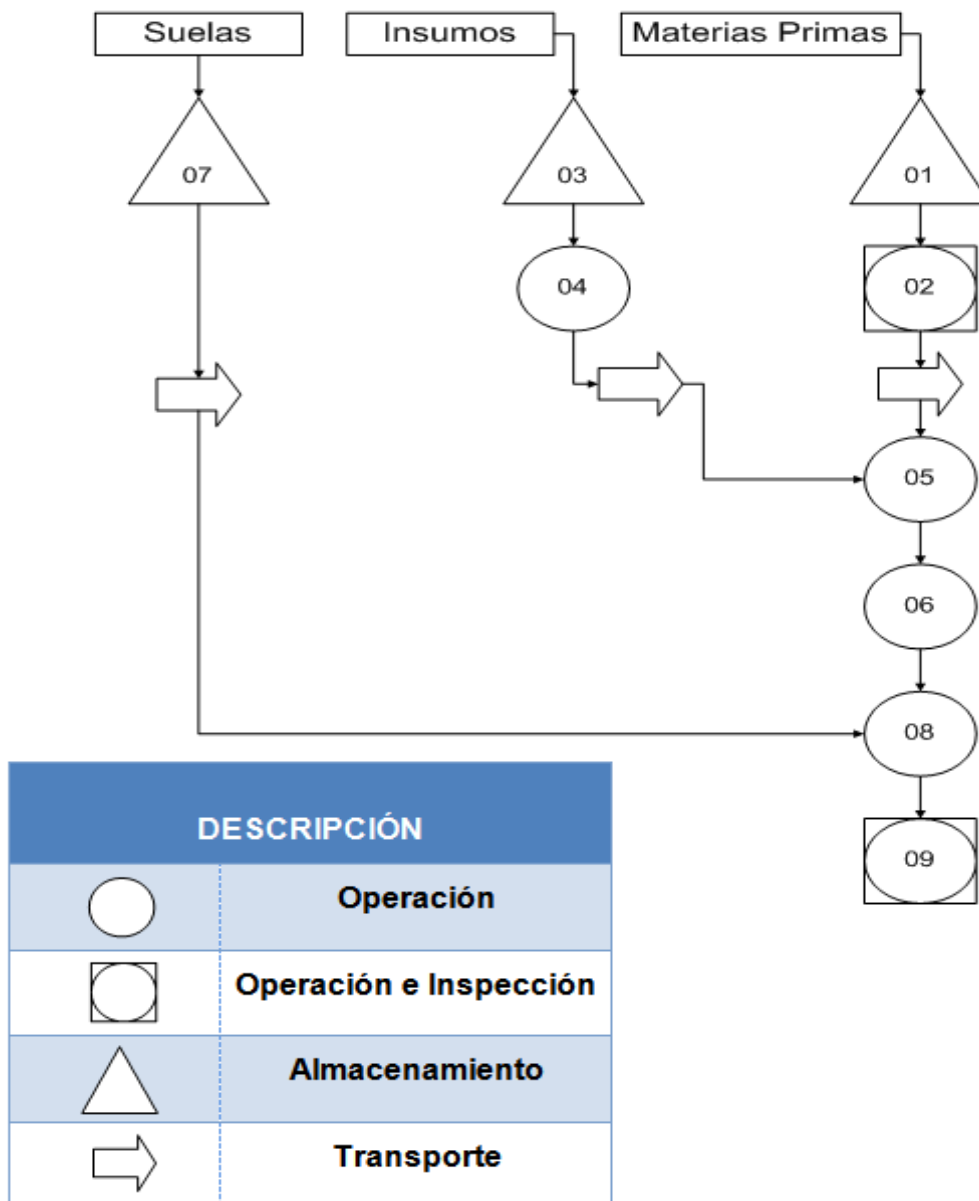
- **Operación 6. Acabados Finales:** Para terminar el producto se ejecuta la operación de acabados finales, su objetivo es deshormar y verificar que el calzado se encuentre con las condiciones de calidad requeridas para poder

ser despachado al comprador. Para ello, el calzado es enfriado y removido de la horma; cualquier hilo o material de desecho son retirados por un soplador de aire caliente. Luego, el calzado es limpiado, inspeccionado y empackado.

5.1.2 Diagrama de Operaciones

Figura 10. Diagrama de Operaciones Caso Estudio.

Elaborado: 27 de Junio de 2011. Versión 1



Fuente: Autores

Tabla 5. Descripción de operaciones

TABLA DE OPERACIONES	
OPERACIÓN	DESCRIPCIÓN
01	Almacenamiento de Materias Primas
02	Inspeccionar y Cortar Cuero
03	Almacenamiento de Insumos
04	Cortar forro interno
05	Unir piezas
06	Hormar
07	Almacenamiento de Suelas
08	Ensuelar
09	Hacer acabados finales e Inspeccionar producto terminado

Fuente: Autores

5.1.3 Tiempos de Operación

Los tiempos de todas las operaciones fueron obtenidos de un trabajo de estandarización de tiempos realizado por la compañía estudiada, estos tiempos incluyen los desplazamientos, la preparación, operación y suplemento, ese trabajo arrojó los siguientes resultados:

Tabla 6. Tiempos Por Operación

Medias y Desviación Estándar de Operaciones		
Operación	Media(seg)	Desviación Estándar (seg)
Corte de Cuero Rápido	87	5
Corte de Cuero Lento	117	8
Terminar Unión de Piezas	220	12
Terminar Colocación de bisutería	60	3
Terminar Hormado	150	8
Terminar Ensuelado	74	2
Terminar Acabados Finales	77	3

Fuente: Caso Estudio

Adicionalmente en el estudio se realizó la prueba Chi-Cuadrado para validar la distribución de probabilidad que puede ser utilizada como patrón para generar valores con las mismas propiedades estadísticas de la muestra, el resultado de esta prueba aceptó la hipótesis que los tiempos de la muestra tienen una distribución de probabilidad Normal.

5.1.4 Tipo de Personalización

El enfoque que se dé a la Personalización Masiva es una característica importante para la elaboración de un modelo computacional que representa el sistema de producción, indistintamente de la compañía que se esté estudiando, porque a partir de esta característica se define el funcionamiento de las operaciones.

Para definir el enfoque que tiene el caso estudio en la aplicación de la Personalización Masiva este trabajo se basa en los cuatro enfoques propuestos por Gilmore y Pine (1997), los cuales fueron expuestos en la parte tres de este trabajo de grado “Características De Los Sistemas De Producción Que Trabajan En El Ambiente De Personalización Masiva.”. En este sentido, la definición que más se ajusta a las características del caso estudio descritas anteriormente, es el enfoque de Personalización Adaptativa, el cual según Gilmore y Pine (1997) “es ofrecer un producto estándar, pero que puede ser personalizado, ya que los componentes pueden ser elegidos por los consumidores”.

5.2 Indicadores

El objetivo principal de este trabajo de grado es mejorar algunos indicadores del sistema productivo que se presentó anteriormente, dichos indicadores se agrupan en indicadores de flexibilidad e indicadores de nivel de personalización y se expondrán a continuación.

5.2.1 Indicadores de Nivel de Personalización

Los indicadores de nivel de personalización están orientados a medir que opciones tienen los clientes de adaptar los productos que ofrece el sistema de producción del caso estudio a sus necesidades específicas, estas mediciones son importantes principalmente porque la empresa trabaja bajo un ambiente de Personalización Masiva. Los indicadores de nivel de personalización propuestos en este trabajo de grado son los siguientes:

Este indicador muestra el porcentaje de las operaciones del proceso de producción de calzado que pueden ser personalizadas por lo clientes. Teniendo en cuenta que el número total de operaciones del proceso es constante, entonces al incrementar el número de operaciones personalizadas el porcentaje de personalización del proceso también aumenta.

Donde:

Este indicador mide cuántas opciones de personalización hay en promedio por cada operación del sistema productivo. Al incrementar las opciones de personalización que tienen los clientes cada uno de ellos tiene la posibilidad de elegir un producto que cumpla de una mejor manera con sus requerimientos, es decir, que incrementa personalización de los bienes.

5.2.2 Indicadores de Flexibilidad

En términos generales los ambientes Job-Shop reflejan bajas utilizaciones de los activos productivos, esta ineficiencia es justificada con altos niveles de personalización, por el contrario los ambientes de Producción en Masa se caracterizan generalmente por mantener altas las utilizaciones de los activos productivos y por manufacturar productos estandarizados, de lo cual se puede concluir que a mayor nivel de personalización tengan los productos menor es el porcentaje de utilización de la maquinaria, y viceversa, esta relación inversamente proporcional es considerada en este trabajo de grado como la NO flexibilidad del sistema, es decir, que el sistema será flexible en la medida que logre tener niveles de personalización altos y utilización de maquinarias altas, en este sentido el nivel de flexibilidad será medido con los siguiente indicadores:

Donde:

Este indicador compara el tiempo que las máquinas están realizando tareas productivas ponderado por el % P.P con respecto al tiempo total que las máquinas están disponibles para producir. Para mejorar este indicador se debe encontrar un balance entre la eficiencia en la utilización de los equipos y el nivel de personalización del proceso.

Donde:

Este indicador busca medir el intervalo de tiempo promedio que el sistema productivo se tarda en manufacturar un nuevo producto y compararlo con el número total de diferentes tipos de productos que pueden ser manufacturados. Si el volumen de producción incrementa conjuntamente con este indicador y teniendo en cuenta que se está estudiando un ambiente donde se fabrican bienes

personalizados, se concluye que el sistema no es capaz de responder de una manera eficiente al incremento en la producción de bienes personalizados.

5.3 Parámetros

- **Disponibilidad de Materias Primas, Insumos y herramientas:** Las materias primas como los cueros, los insumos como los pagamentos e hilos y herramientas del proceso como las hormas siempre se encontrarán disponibles, por tanto en el proceso no se presentarán paros o fallas por falta de estos recursos.
- **NO contemplación de incidencias negativas en las máquinas:** Se asume que cuando una máquina este procesando un producto es la única causa de que ésta no esté disponible, por tanto no se contemplarán otras incidencias negativas que podrían dejar fuera servicio la máquina, como por ejemplo una avería, falta de flujo energético etc.
- **Demanda:** Para el caso estudio, se considerará un tiempo entre llegadas del cliente con distribución exponencial con λ este tiempo es extraído del trabajo de estandarización de tiempos elaborado por la compañía objeto de estudio. Según Guasch et al (2005) esta distribución de probabilidad es la adecuada para modelar el tiempo de llegada entre clientes y está relacionada con la distribución Poisson de la siguiente forma $P_n = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}$.
- **Prioridad de los pedidos:** Para evitar bloqueos en la simulación de Microsoft Excel ® en caso de que se presenten varias opciones para activar una transición, es necesario definir una secuencia de procesamiento de los pedidos, para el caso inicial en todas las operaciones se dará prioridad a los pedidos que exigen diseños lentos. En el caso mejorado para los pedidos que están esperando empezar el proceso de corte se dará prioridad a los pedidos con diseño lento y como segunda prioridad a los pedidos con bisutería, para las demás operaciones se dará prioridad a los pedidos que llevan bisutería y como segunda prioridad a los pedidos con diseño lento.
- **Almacenes de Productos sin restricción de capacidad:** Los almacenes de los productos en proceso y terminados se consideran con capacidad ilimitada.

- **Estado inicial del operario, de las máquinas y de los almacenes:** Tanto en la simulación de caso inicial como del caso mejorado en el instante 0 de tiempo la maquinaria y el personal operativo van a estar disponible, y no habrá inventario de producto en proceso ni de producto terminado.

5.4 Casos a simular

5.4.1 Caso inicial

En primera instancia los clientes pueden elegir dos tipos de diseños para su calzado, un diseño que puede ser cortado rápidamente y otro que toma más tiempo en el proceso de corte, en las demás operaciones el cliente puede elegir opciones como por ejemplo el tipo de suela, el color de los recubrimientos internos, el tipo de bisutería que desea, sin embargo esas elecciones no afectan los tiempos de operación, por tanto estas opciones no serán tenidas en cuenta para la medición de los indicadores de este caso estudio.

Para el proceso de corte se cuenta con dos máquinas cortadoras, una máquina especializada en el diseño lento y otra especializada en el diseño rápido, los estados de la máquina que elabora los diseños lentos están representados por los lugares P4 y P5 de la Red de Petri del Caso Inicial (Figura 11), mientras que los estados de la máquina que elabora los diseños rápidos están representados por los lugares P2 y P4 de dicha red.

Igualmente la compañía cuenta con una máquina cosedora para realizar la unión de piezas representada por lugares P7 y P8 de la Red de Petri del Caso Inicial (Figura 11), un operario que pone la bisutería del calzado representado por los lugares P10 y P11, una máquina hormadora representada por los lugares P13 y P14, una máquina ensueladora y una máquina para llevar a cabo los acabados finales representadas por los lugares P16, P17, P19 y P20 respectivamente. Para ver los resultados que se obtuvieron en la simulación del caso inicial en Microsoft Excel ® de los indicadores propuestos ver Tabla 17.

5.4.2 Caso Mejorado

Para el caso mejorado se mantiene las dos opciones de diseño del calzado para los clientes (lento y rápido), pero a diferencia del caso inicial los clientes pueden tomar la decisión de poner o no poner bisutería a su calzado, con el fin de incrementar el número de opciones que los clientes pueden elegir, esto conlleva a

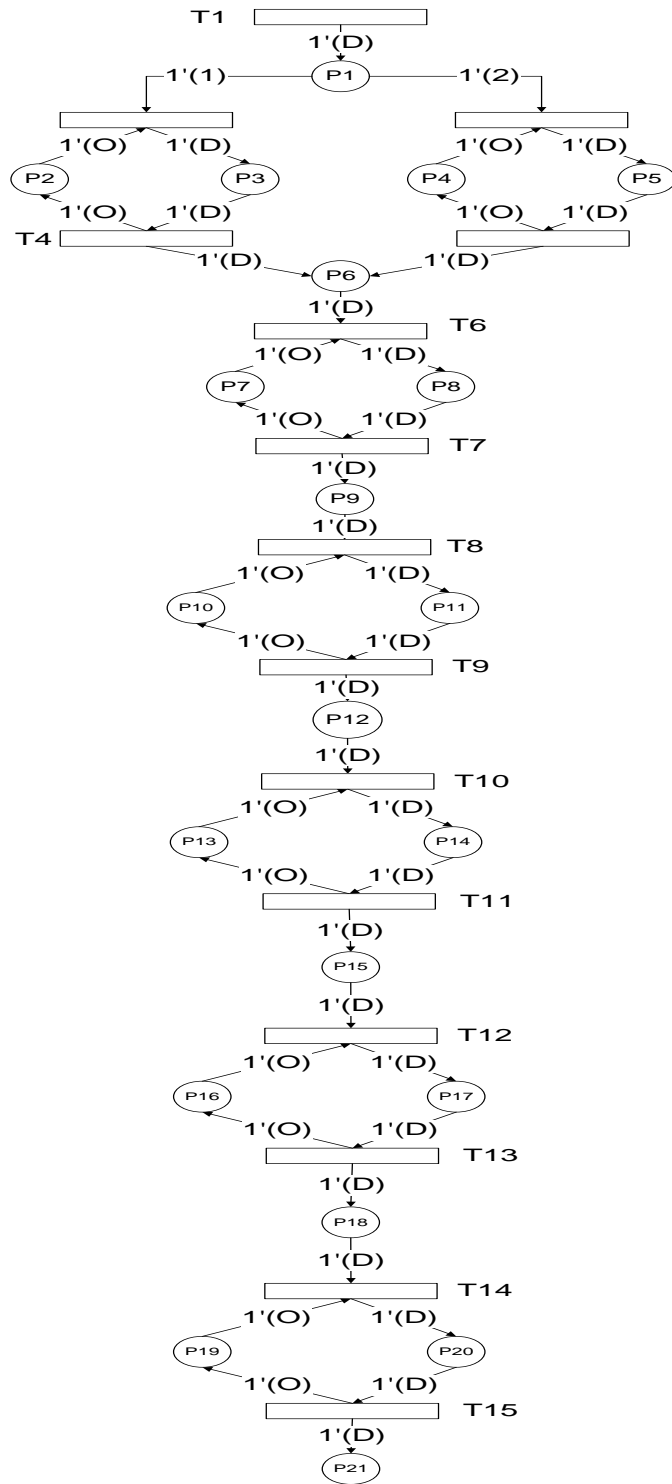
un cambio en la Rede de Petri del Caso Mejorado (Figura 12), estas dos posibilidades se representan por las transiciones T6 y T7, en dicha red se puede ver que la transición T6 que representa el evento de iniciar la colocación de bisutería solo se activa si el pedido lleva bisutería, caso contrario el pedido pasara a la cola de productos en espera de ser hormados (Lugar P10 de la Rede de Petri del Caso Mejorado (Figura 12)).

Antes de llevar a cabo la simulación del caso mejorado se puede predecir que muy posiblemente el operario de bisutería iba a disminuir su porcentaje de ocupación que ya era bajo en el caso inicial debido a los cambios en las opciones de bisutería, sin embargo, el hecho que sea una persona hace que una disminución de este indicador no sea deficiente, debido a que ésta persona puede ser empleada en otros oficios de la compañía. Caso contrario pasa con el porcentaje de ocupación de la cortadora 1 y cortadora 2, ya que éstas solo pueden dedicarse a cortar. Con el fin de mejorar la utilización de estas máquinas, se propone reemplazar las cortadora 1 y la cortadora 2 por una sola máquina que sea capaz de cortar los dos tipos de diseños, el hecho que el porcentaje de utilización de la cortadora 1 y la cortadora 2 sea menor que el 100 por ciento (Ver Tabla 16) en el caso inicial permite que la nueva máquina tenga una velocidad de procesamiento igual a la velocidad de la máquinas viejas. Por tanto los tiempo de operación para el corte de cuero rápido y lento seguirán teniendo la misma distribución de probabilidad, la misma media y la misma desviación estándar, dicha máquina está representada por los lugares P2 y P3 de la Rede de Petri del Caso Mejorado (Figura 12). Para ver los resultados que se obtuvieron en la simulación del caso mejorado en Microsoft Excel® de los indicadores propuestos ver Tabla 17.

5.5 Redes de Petri Caso Estudio

5.5.1 Red de Petri Inicial

Figura 11. Diagrama Red de Petri Caso Inicial



Fuente: Autores

Tabla 7. Transiciones Red De Petri Caso Inicial

Transiciones	
T1	Llegada de un pedido
T2	Iniciar corte en máquina 1
T3	Iniciar corte en máquina 2
T4	Terminar corte en máquina 1
T5	Terminar corte en máquina 2
T6	Iniciar unión de piezas
T7	Terminar unión de piezas
T8	Iniciar colocación de bisutería
T9	Terminar colocación de bisutería
T10	Iniciar hormado
T11	Terminar hormado
T12	Iniciar ensuelado
T13	Terminar ensuelado
T14	Iniciar acabados finales
T15	Terminar acabados finales

Fuente: Autores

Tabla 8. Lugares Red De Petri Caso Inicial

Lugares	
P1	Número de pedidos en cola
P2	Disponibilidad de máquina cortadora 1
P3	Ocupación de máquina cortadora 1
P4	Disponibilidad de máquina cortadora 2
P5	Ocupación de máquina cortadora 2
P6	Cola de calzados productos esperando por ser unidos
P7	Disponibilidad de máquina cosedora
P8	Ocupación de máquina cosedora
P9	Cola de espera de productos que ya fueron unidos
P10	Disponibilidad de operario de Bisutería
P11	Ocupación de operario de bisutería

P12	Cola de productos en espera de ser hornados
P13	Disponibilidad de máquina hornadora
P14	Ocupación de máquina hornadora
P15	Cola de productos en espera de ser ensuelados
P16	Disponibilidad de máquina ensueladora
P17	Ocupación de máquina ensueladora
P18	Cola de productos en espera de los acabados finales
P19	Disponibilidad de máquina de acabados finales
P20	Ocupación de máquina de acabados finales
P21	Almacén de producto terminado

Fuente: Autores

Tabla 9. Colores Red De Petri Caso Inicial

Colores		
D	Tipo de Diseño	1=Rápido, 2=Lento
B	Bisutería	1=Lleva Bisutería
C	Cortadora	1=Cortadora Rápida, 2=Cortadora Lenta
U	Cosedora	
OB	Operario de Bisutería	
H	Hornadora	
E	Ensueladora	
AF	Máquina de acabados finales	

Fuente: Autores

Tabla 10. Conjunto de Colores Asociados a Cada Lugar, Red De Petri Caso Inicial

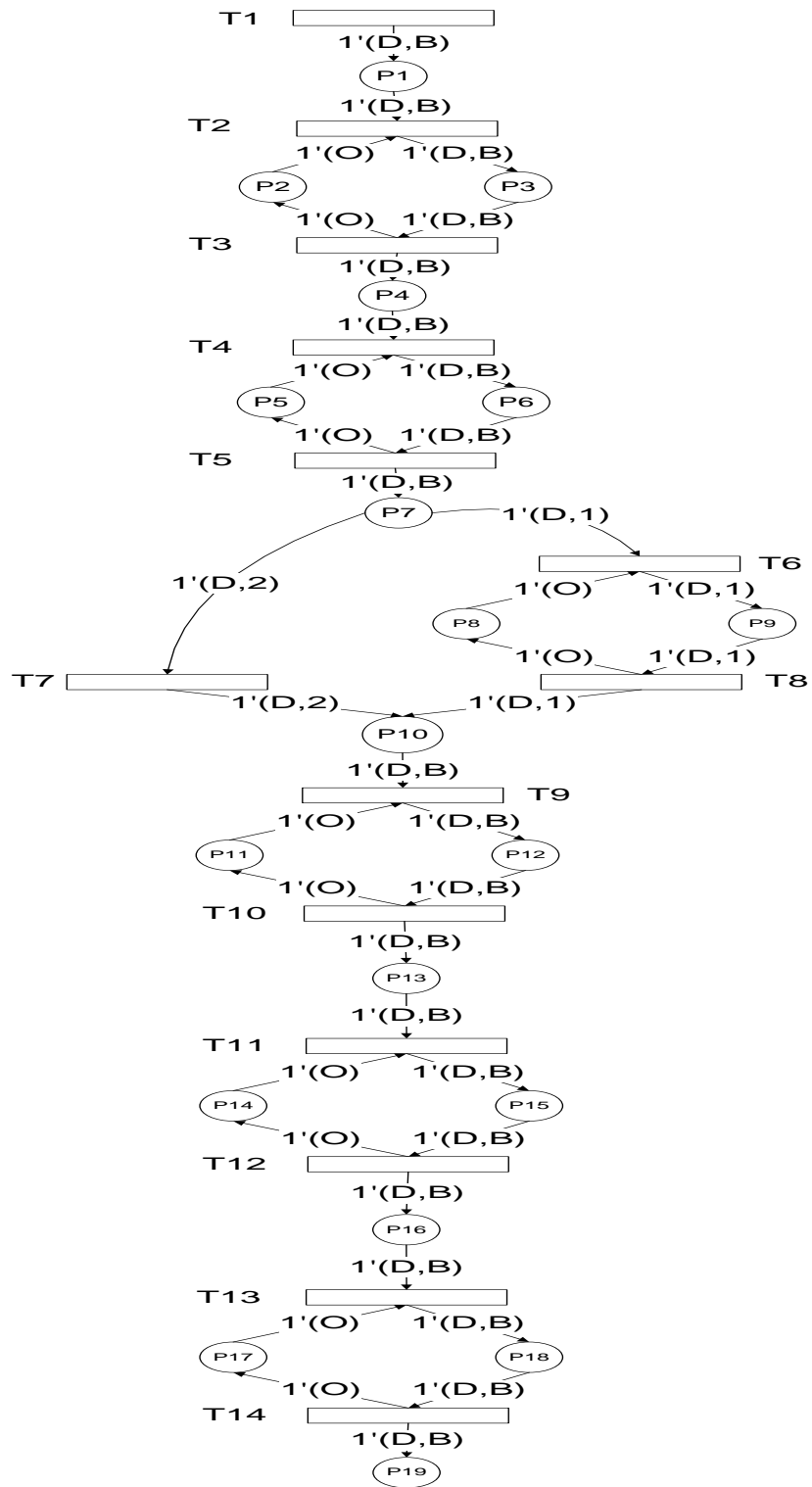
Conjunto de Colores Asociados a cada lugar	
C(P1)	D
C(P2)	C
C(P3)	D
C(P4)	C
C(P5)	D
C(P6)	D

C(P7)	U
C(P8)	D
C(P9)	D
C(P10)	OB
C(P11)	D
C(P12)	D
C(P13)	H
C(P14)	D
C(P15)	D
C(P16)	E
C(P17)	D
C(P18)	D
C(P19)	AF
C(P20)	D
C(P21)	D

Fuente: Autores

5.5.2 Red de Petri mejorada

Figura 12. Diagrama Red de Petri Caso Mejorado



Fuente: Autores

Tabla 11. Transiciones Red De Petri Caso Mejorado

Transiciones	
T1	Llegada de un pedido
T2	Iniciar corte en máquina
T3	Terminar corte en máquina
T4	Iniciar unión de piezas
T5	Terminar unión de piezas
T6	Iniciar colocación de bisutería
T7	Trasladar calzados que no llevan bisutería
T8	Terminar colocación de bisutería
T9	Iniciar hormado
T10	Terminar hormado
T11	Iniciar ensuelado
T12	Terminar ensuelado
T13	Iniciar acabados finales
T14	Terminar acabados finales

Fuente: Autores

Tabla 12. Lugares Red De Petri Caso Mejorado

Lugares	
P1	Número de pedidos en cola
P2	Disponibilidad de máquina cortadora
P3	Ocupación de máquina cortadora
P4	Cola de calzados productos esperando por ser unidos
P5	Disponibilidad de máquina cosedora
P6	Ocupación de máquina cosedora
P7	Cola de espera de productos que ya fueron unidos
P8	Disponibilidad de operario de Bisutería
P9	Ocupación de operario de bisutería
P10	Cola de productos en espera de ser hormados
P11	Disponibilidad de máquina hormadora
P12	Ocupación de máquina hormadora
P13	Cola de productos en espera de ser ensuelados

P14	Disponibilidad de máquina ensueladora
P15	Ocupación de máquina ensueladora
P16	Cola de productos en espera de los acabados finales
P17	Disponibilidad de máquina de acabados finales
P18	Ocupación de máquina de acabados finales
P19	Almacén de producto terminado

Fuente: Autores

Tabla 13. Colores Red De Petri Caso Mejorado

Colores		
D	Tipo de Diseño	1=Rápido, 2=Lento
B	Bisutería	1=Lleva Bisutería 2= No lleva Bisutería
C	Cortadora	
U	Cosedora	
OB	Operario de Bisutería	
H	Hormadora	
E	Ensueladora	
AF	Máquina de acabados finales	

Fuente: Autores

Tabla 14. Conjunto de Colores Asociados a Cada Lugar, Red De Petri Caso Mejorado

Conjunto de Colores Asociados a cada lugar	
C(P1)	$D \wedge B$
C(P2)	C
C(P3)	$D \wedge B$
C(P4)	$D \wedge B$
C(P5)	U
C(P6)	$D \wedge B$
C(P7)	$D \wedge B$
C(P8)	OB
C(P9)	$D \wedge B$
C(P10)	$D \wedge B$

C(P11)	H
C(P12)	D ^ B
C(P13)	D ^ B
C(P14)	E
C(P15)	D ^ B
C(P16)	D ^ B
C(P17)	AF
C(P18)	D ^ B
C(P19)	D ^ B

Fuente: Autores

5.6 Herramienta Computacional para simular

De acuerdo a las herramientas expuestas en el en capitulo 4 para simular eventos discretos por medio de Redes de Petri, se determina que para este caso estudio se utilizará la simulación por medio Microsoft Excel ®, debió a que este cumple con las características requeridas para la simulación del proceso, además de ello, es un software de fácil adquisición para cualquier empresa por su bajo costo, bajos requerimientos tecnológicos y facilidad de encontrar en el mercado.

Una de las características importantes de Microsoft Excel ® es la facilidad para generar números aleatorios uniformemente distribuidos en un rango dado, este es el primer paso para generar los valores estocásticos de las características de los pedidos de los clientes, del tiempo de llegada de los clientes y de los tiempos de procesamiento de las máquinas.

Para determinar los tiempos de llegada de los pedidos y de los tiempos de procesamiento de las máquinas y el operario, se generaron números aleatorios entre 0 y 1, posteriormente estos números se convirtieron en valores los cuales siguen la distribución de probabilidad asociada con el método de la transformada inversa. Microsoft Excel ® cuenta con la función inversa de la distribución de probabilidad Normal, sin embargo no cuenta con la función inversa de la distribución exponencial, por tanto se utilizo la siguiente fórmula expuesta por Guasch et al (2005) para ejecutar este paso:

Donde $\rightarrow U(0,1)$: es un número aleatorio entre 0 y 1.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN

6.1 Resultado de la Simulaciones

Como se mencionó anteriormente la línea de producción tiene un comportamiento estocástico, por tanto los resultados en las utilidades de los equipos y la ocupación del personal son aleatorios con distribución de probabilidad binomial. Para estimar el valor de los indicadores tanto del caso inicial como del caso mejorado se utilizaron como medidas estadísticas la media aritmética y la desviación estándar, para hallar el valor de estas medidas se tomó una prueba piloto de diez (10) simulaciones de una jornada laboral de ocho horas (8h) (Ver Anexo 1a y Anexo 1b), a partir de la cual se calculó un tamaño de muestra adecuado para tener un nivel de confianza del 95% y un error del 10%, con la siguiente fórmula:

Donde:

Z: Valor de la distribución normal estándar invertida correspondiente a un nivel de confianza del 95%.

p: Probabilidad de encontrar la máquina ocupada. Media de la prueba piloto.

q: Probabilidad de encontrar la máquina disponible. Y es igual a (1-p)

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 15. Resultados Media Muestral y Tamaño de Muestra

Descripción	Caso Inicial		Caso Mejorado	
	Media Muestral	Tamaño de Muestra	Media Muestral	Tamaño de Muestra
Utilización de Máquina Cortadora 1	34,48%	13,81	82,08%	5,86
Utilización de Máquina Cortadora 2	44,86%	16,55	N/A	
Utilización de Máquina Cosedora	99,70%	0,00	99,79%	0,00
Ocupación de Operario de Bisutería	27,05%	10,54	22,78%	8,37
Utilización de Hormadora	67,52%	13,01	67,29%	13,11
Utilización de Ensueladora	33,13%	13,28	32,90%	13,19
Utilización de máquina Acabados Finales	34,41%	13,78	34,27%	13,73

Fuente: Autores

Después de realizar las N simulaciones (Ver Anexo 2a y Anexo 2b), las medias de los indicadores de utilización de las máquinas y de ocupación de los operarios fueron las siguientes:

Tabla 16. Indicadores de Utilización de las Máquinas y Ocupación de los operarios

Descripción	Caso Inicial	Caso Mejorado
	Media Poblacional	Media Poblacional
Utilización de Máquina Cortadora 1	34,87%	81,62%
Utilización de Máquina Cortadora 2	45,56%	N/A
Utilización de Máquina Cosedora	99,74%	99,85%
Ocupación de Operario de Bisutería	27,02%	22,74%
Utilización de Hormadora	67,42%	67,31%
Utilización de Ensueladora	33,09%	32,95%
Utilización de máquina Acabados Finales	34,35%	34,28%

Fuente: Autores

A partir de la información anterior se obtuvieron los siguientes resultados

Tabla 17. Variación Porcentual de los Indicadores

Indicadores	Valor Inicial	Valor Mejorado	Variación Porcentual
PORCENTAJE DE PERSONALIZACIÓN DEL PROCESO	16,7%	33,3%	100,0%
NÚMERO DE OPCIONES PROMEDIO	33,3%	66,7%	100,0%
T.C.P.P (MINUTOS)⁴	1,88	0,94	-50%
%U X % P.P			
<i>%U X % P.P cortadoras (Ponderado)⁵</i>	7,3%	26,8%	268,2%
<i>%U X % P.P Cosedora</i>	16,6%	33,3%	100,3%
<i>%U X % P.P Bisutería</i>	4,5%	7,6%	68,3%
<i>%U X % P.P Hormadora</i>	11,2%	22,5%	99,9%
<i>%U X % P.P Ensueladora</i>	5,5%	11,0%	99,5%
<i>Utilización de máquina Acabados Finales</i>	5,7%	11,4%	99,8%

Fuente: Autores

6.2 Análisis de la Simulaciones

Se puede observar que todos los indicadores elaborados presentaron un mejoramiento de la condición inicial a la mejorada

El indicador que presentó una mayor variación porcentual fue %U x %P.P de la máquina cortadora, porque los dos factores de la formula mejoraron, mientras que los demás indicadores presentaron una mejora de en un 100% en promedio, esta mejora se debe principalmente a la mejora que hubo en el indicador de porcentaje de personalización del proceso ya que él porcentaje de utilización de las máquinas y el tiempo de ciclo permaneció constante.

⁴ La media de productos terminados fue de 128 unidades tanto en el caso inicial como en el mejorado (Ver Anexo 3)

⁵ Se calculó un promedio ponderado de la utilización de la cortadora 1 y 2 del caso inicial según el tipo de diseño de los productos terminados. Para poder comparar con el indicador de utilización de la máquina cortadora del caso mejorado.

7. CONCLUSIONES

- Este trabajo de grado mostró el funcionamiento inicial de un sistema productivo bajo un ambiente de Personalización Masiva, a través, de simulaciones con Redes de Petri, con este tipo de simulación se obtuvo un alto grado de realismo porque las Redes de Petri permitieron adaptar las variables aleatorias al modelo que fue ejecutado en Microsoft Excel ®. El análisis de este funcionamiento permitió proponer cambios al sistema, los cuales permitieron alcanzar el objetivo de mejorar los indicadores de personalización y flexibilidad.
- La Personalización Masiva al igual que todos los paradigmas de producción presenta ventajas y desventajas que deben ser evaluadas al momento de aplicar sus conceptos. Dentro de las ventajas más importantes de este paradigma se encuentra la fidelización del cliente, gracias al cumplimiento de necesidades individuales y la posibilidad de convertirse en un líder del mercado con una estrategia que mezcla precio y producto, la cual es difícil de imitar. Dentro de las desventajas se encuentra una gran inversión en maquinaria, equipos y tecnología para poder planear, programar, controlar y ejecutar la producción; otra desventaja es la insipiente investigación e interrelación entre la academia y la empresa.
- La Personalización Masiva frente a los otros sistemas de producción siempre buscará la integración y optimización de los productos y procesos, donde la tecnología hace parte fundamental de este, permitiendo la adaptación de los requerimientos manifestados por el cliente.
- Las Redes de Petri básicas a pesar de permitir representar un sistema de eventos discretos son muy rígidas para representar sistemas complejos, sin embargo las modificaciones y mejoras que se han realizado desde que fueron inventadas por Carl Adam Petri han permitido representar satisfactoriamente una gama de sistemas que van desde los más sencillos hasta los más complejos, en diferentes áreas de investigación.
- Las Redes de Petri Coloreadas permiten asociar información y dar características a todos aquellos atributos que hacen parte del proceso, lo que permite reducir el tamaño de una Red de Petri ordinaria.

- A pesar que las Redes de Petri pueden representar satisfactoriamente un gran número de sistemas, necesitan un complemento que permita recolectar información y ejecutar de una manera ágil y exacta los cambios que ocurren en él. En este sentido Microsoft Excel ® fue un buen complemento porque además de cumplir las exigencias mencionadas anteriormente es un software de bajo costo y de fácil adquisición en comparación con los otros que se expusieron en este proyecto.
- En este trabajo de grado quedó evidenciado el potencial que tienen las Redes de Petri complementadas con un buen software para representar sistemas de producción, sin embargo la base fundamental para que esta representación sea veraz es la correcta elaboración de un estudio de métodos y tiempos.
- Con el caso estudio analizado se hace evidente que los indicadores utilizados tanto en personalización como en flexibilidad, permiten evaluar y elegir el mejor escenario, en el cual interactúa la Personalización Masiva.
- El modelo de la Red de Petri Mejorada, elaborado en el marco del caso estudio, permite obtener resultados factibles, los cuales incrementan el porcentaje de utilización de las máquinas conjunto con el porcentaje de personalización de proceso.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Arena Standard User Guide, 3 ed. Sewickley, Pennsylvania: Rockwell Software, 2005. 121p.
- AVELLA, Lucía y VÁZQUEZ, Daniel. ¿Es la fabricación ágil un nuevo modelo de producción?, *Universia Business Review: Actualidad económica*. (Segundo trimestre, 2005); p. 94-107.
- BARNETT, Lee., RAHIMIFARD, Shahin y NEWMAN, Stephen. Distributed scheduling to support mass customization in the show industry. En: *International Journal Computer Integrated Manufacturing* [Base de datos en línea]. Vol 17, Issue 7, (Noviembre, 2004); 623-632 p. [Citado el 23 de Mayo del 2010] Disponible en EBSCO HOST.
- BLECKER, Thorsten., FRIEDRICH, Gerhard. , KALUZA ,Bernd, ABDELKAFI, Nizar., y KREUTLE, Gerold. *Information and management systems for product customization*. New York: Springer Science + Business Media, Inc, 2005. 269p.
- BOUAMRA, O., Morrison, E., (2000) Teaching and learning discrete-event simulation & modelling with Witness ®, *Maths, Stats and O.R.*, Vol. 0, Issue 2, 6-10p.
- CARMO-SILVA, S., ALVES, A.C., MOREIRA, F. Linking production paradigms and organizational approaches to production systems. En: *Intelligent Production Machines and Systems* [Base de datos en línea]. 2nd I*PROMS Virtual International Conference, (Julio, 2006); 511-516 p. Disponible en Science Direct.
- CAY, F., CHASSAPIS, C. An IT view on perspectives of computer aided process planning research. En: *Computer in Industry* [Base de datos en línea]. Vol. 34, Issue 3, (Diciembre, 1997); 307-337 p. Disponible en Science Direct.
- CHENG, G., LIU, Z.Y. The Research Of Modeling & Simulation On Improving Efficiency for Job Shop In Manufacturing Enterprise. En: *Industrial Engineering and Engineering Management* [Base de datos en línea].Vol 2 , Issue 21-23 (Oct.2009); 1984-1987p. Disponible IEEE Xplore.
- DANIELS, John. Et al. *Negocios Internacionales: Ambientes y Operaciones*.cap 18 *Manufactura Global y Gestión de la Cadena de Abasto*. Pearson Education. Décima Edición, 2004
- D'SOUZA, K.A., A control model for detecting deadlocks in an automated machining cell. En: *Computers & Industrial Engineering* [Base de datos en

línea]. Vol 26, Issue 1, (Enero, 1994); 133-139 p. Disponible en Science Direct.

- DA SILVEIRA, G., BORENSTEIN, D y FOGLIATTO, F. Mass Customization: literature review and research directions. En: International Journal of Production Economics [Base de datos en línea]. Vol 72, Issue 1, (Junio, 2001); 1-13 p. Disponible en Science Direct.
- DAVID, R. y ALLA, H., Petri Nets and Grafcet: Tools for Modelling Discrete Event Systems. 1 Edición: New Jersey: Prentice-Hall, 1992. 671 p.
- DI PIERRI, Carla. De la producción masiva a la personalización masiva: los deseos de los consumidores y las nuevas tecnologías como factores modeladores del cambio. Vol 23, Issue 44, Marzo de 2006; p. 21-31.
- DOMÍNGUEZ, José ., ÁLVAREZ , Maria. , GARCÍA, Miguel. , RUIZ , Antonio.. Dirección de operaciones: aspectos estratégicos en la producción y los servicios. En: ___ La selección y diseño del proceso. España. McGraw-Hill Interamericana, 1995. p.482.
- EASTWOOD, Margaret A. Implementing Mass Customization: Motorola Manufacturing Systems, Motorola Inc. En: Computers in Industry [Base de datos en línea]. Vol 30, Issue 3, (Octubre, 1996); 171-174 p. Disponible en Science Direct.
- GARAVELLI, A.C. Performance analysis of a batch production system with limited flexibility. En: International Journal of Production Economics [Base de datos en línea]. Vol 69, Issue 1, (Enero, 2001); 39-48 p. Disponible en Science Direct.
- GIL, Juan. Exposición Tutorial Del Modelado Y Simulación De Un Establecimiento De Comida Rápida Usando Arena Y Simkit. España, 2006. 168p.Trabajo de grado,(Ingeniero Informático). Universidad Nacional De Educación A Distancia. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca Universidad Nacional de Educación a Distancia:<http://portal.uned.es/portal/page?_pageid=93,505432&_dad=portal&_schema=PORTAL>.
- GILMORE, J.H. y PINE II, B.J. (1997). The Four Faces of Mass Customization. Harvard Business Review, Enero - Febrero, p. 91-101.
- GU, Xj. QI, G N. , YANG, Z X., ZHENG, G J.. Research of the optimization methods for mass customization (MC). En Journal of Materials Processing Technology. [Base de datos en línea]. Vol 129, Issues 1-3, Octubre 11 2002; p 507-512. Disponible en ScienceDirect.
- GUASCH, Antoni, PIERA, Miquel , CASANOVAS, José , FIGUERAS, Jaume. Modelado y Simulación: Aplicación a procesos logísticos de

fabricación y servicio. 1 Edición. México D.F: Alfaomega Grupo Editor, 2005. 358 p.

- HELMS, M., AHMADI, M., JIH, W., ETTKIN, L. Technologies in support of mass customization strategy: Exploring the linkages between e-commerce and knowledge management [Base de datos en línea]. Vol. 59, Issue 4, Abril 2008; p. 351-363. Disponible en ScienceDirect.
- JENSEN, J. B., MALHOTRA M. K., PHILIPOOM P. R. Machine dedication and process flexibility in a group technology environment. En: Journal of Operations Management [Base de datos en línea]. Vol. 14, Issue 1, (Marzo, 1996); 19-39 p. Disponible en Science Direct.
- JENSEN, K. Coloured Petri Nets: basic Concepts, analysis methods and practical use. 2 Edición, Vol. 1. Berlín: Springer-Verlag, 1997. 237p.
- KELTON W. D, SADOWSKI R.P., STURROCK D.T. Simulation with Arena. 3ed., New York, 2003. p. 668.
- KRAJEWSKI, L. J., RITZMAN, L. P. Administración de operaciones: estrategia y análisis. 5 Edición. México: Pearson Educación, 2000. 892p.
- LANEY, Pam y MAYER, Michael. Witness Simulation Software A Flexible Suite Of Simulation Tools. Ohio, USA, 1997. p.1-7.
- LAW AM y KELTON WD. Simulation Modelling and Analysis. New York. 2000. p 760.
- LEE, Jong-Hwan. Modeling, Analysis, and Simulation of Flexible Manufacturing System by using Generalized Stochastic Petri Nets and SIMAN/ARENA. Vol. 30, Issue 10, 2004; p.83-86.
- LI-CHIH, W. y SHAO-YING, W. Modeling with Colored Timed Object-Oriented Petri Nets for automated manufacturing systems. En: Computer Integrated Manufacturing Systems [Base de datos en línea]. Vol. 34, Issue 2, (1998); p. 463-480 [Citado el 25 de Abril del 2010] Disponible en ScienceDirect.
- McCARTHY, Bart; BRABAZON, Philip G y BRAMHAM, Johanna. Fundamental modes of operation for mass customization. En: International Journal of Production Economics. [Base de datos en línea]. Vol. 85, Issue 3, Septiembre 2003; p. 289-304. Disponible en ScienceDirect.
- McCARTHY, Ian P. The what, why and how of mass customization. En: Production, Planning & Control. Vol 15, Issue 4, Junio de 2004; p. 347-351.
- MADIEDO, JUAN PABLO. y THIELL, MARCUS. Personalización Masiva para ciertas empresas. En: Portafolio. 15 DE SEPTIEMBRE DE 2009.

- MARKT, P.L, MAYER, M. H. Witness simulation software a flexible suite of simulation tools. En: Proceedings of the Winter Simulation Conference. Junio 2010; p.714-717.
- MCKENNA, R (1995). Real-Time Marketing. En: Harvard Business Review [Base de datos en línea]. Vol. 73, Issue 4 , (julio-agosto 1995); p. 87-95 Disponible en EBSCO HOST.
- MURATA T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. En: IEEE [Base de datos en línea]. Vol. 77, Issue 4, (Abril, 1989); 541-580 p. Disponible en IEEE Xplore.
- PETRI, Carl Adam, Kommunikation mit Automaten. Bonn, 1962. Tesis Doctoral. Darmstadt University of Technology.
- PIDD, Michael. Computer simulation in management science. 4 ed. USA: San Francisco. Wiley, 1998. 279p.
- PINE II, B.J., Peppers, D. y Rogers, M. (1995). Do You Want To Keep Your Customers Forever? Harvard Business Review (marzo-abril), pp. 103-114.
- RODRÍGUEZ, Germán. Análisis dinámico del comportamiento de una celda de manufactura de piezas metálicas (2006). México. D.F, 2006,151p. Trabajo de grado, (Maestría en ciencias con especialidad en ingeniería mecánica). Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Disponible en el catálogo en línea de la Biblioteca del Instituto Politécnico Nacional: <http://azul.bnct.ipn.mx/>
- SAFÓN CANO, Vicente. ¿Del fordismo al postfordismo?. El advenimiento de los nuevos modelos de organización industrial. EN: I CONGRESO DE CIENCIA REGIONAL DE ANDALUCÍA: ANDALUCÍA EN EL UMBRAL DEL SIGLO XXI (Andalucía) ,1997.
- SELLADURAI, R.S. Mass customization in operations management: oxymoron or reality? [Base de datos en línea]. Vol. 32, Issue 4, Agosto 2004; p. 351-363.Disponible en ScienceDirect.
- Simulador Arena. [En línea] <<http://www.arenasimulation.com>>, [Citada el 6 de mayo 2011].
- Sistema de Fabricación Flexible : SMF. En Ingeniería: Boletín Electrónico Universidad Rafael Landívar. Vol 3; p1-25.
- SQUIRE, Brian, READMAN, Jeff, STEVE, BESSANT, John (2004). Mass customization: the key to customer value?. Production Planning & Control, Vol. 15, No. 4, pp. 459-471.
- SSEMAKULA, M.E. Process planning system in the CIM environment. En: Computers & Industrial [Base de datos en línea]. Vol. 19, Issue 1–4. (1990); 452–456 p. Disponible en ScienceDirect.

- TAYFUR Altiook y MELAMED, Benjamin. Simulation Modeling and Analysis with Arena. USA, (2007). p 1-10.
- UNIVERSIDAD DE HUELVA. Curso de Automatización Industrial 2009-2010 [En línea]. < http://www.uhu.es/diego.lopez/AI/auto_trans-tema3.PDF>
- VAN DER AALST. W.M.P. Petri net based scheduling. En: OR Spectrum [Base de datos en línea]. Vol. 18, Issue 4, (Diciembre, 1996); 219-229 p. Disponible en Springer Link.
- XUANA, Hua y TANGB ,Lixin. Scheduling a hybrid flowshop with batch production at the last stage. [Base de datos en línea]. Vol. 34, Issue 9, Septiembre 2009; p.2718-2733. Disponible en ScienceDirect

9. ANEXOS

ANEXO 1. Resultados de los indicadores de utilización en las simulaciones.

Descripción	SIMULACIÓN CASO INICIAL									
	Sim.1	Sim. 2	Sim.3	Sim.4	Sim.5	Sim.6	Sim.7	Sim.8	Sim.9	Sim.10
<i>Utilización de Máquina Cortadora 1</i>	35,81%	34,79%	29,52%	42,80%	32,02%	33,65%	42,76%	35,50%	33,98%	23,94%
<i>Utilización de Máquina Cortadora 2</i>	47,88%	42,37%	39,49%	43,03%	43,85%	47,78%	51,21%	47,61%	44,87%	40,52%
<i>Utilización de Máquina Cosedora</i>	99,73%	100,00%	99,51%	100,00%	99,72%	100,00%	99,98%	97,92%	99,66%	99,90%
<i>Ocupación de Operario de Bisutería</i>	27,02%	27,33%	26,81%	27,18%	26,83%	27,45%	27,25%	26,78%	26,99%	26,89%
<i>Utilización de Hormadora</i>	68,33%	68,08%	67,07%	67,77%	67,12%	67,89%	68,23%	66,61%	67,43%	66,65%
<i>Utilización de Ensueladora</i>	32,93%	33,44%	32,95%	33,23%	32,91%	33,59%	33,36%	32,52%	33,41%	32,96%
<i>Utilización de máquina Acabados Finales</i>	34,29%	34,68%	34,36%	34,39%	34,19%	34,86%	34,75%	34,07%	34,32%	34,23%

a. Simulación Inicial

Descripción	SIMULACIÓN CASO MEJORADO									
	Sim.1	Sim. 2	Sim.3	Sim.4	Sim.5	Sim.6	Sim.7	Sim.8	Sim.9	Sim.10
<i>Utilización de Máquina Cortadora</i>	79,52%	85,46%	81,68%	93,76%	80,47%	80,42%	74,86%	79,16%	80,47%	84,97%
<i>Utilización de Máquina Cosedora</i>	99,32%	99,82%	99,99%	99,93%	100,23%	99,81%	99,27%	100,06%	99,48%	99,94%
<i>Ocupación de Operario de Bisutería</i>	23,40%	21,46%	23,74%	25,71%	22,43%	22,21%	22,09%	19,31%	22,91%	24,58%
<i>Utilización de Hormadora</i>	66,46%	66,64%	67,38%	67,52%	67,48%	67,94%	66,99%	67,95%	67,26%	67,27%
<i>Utilización de Ensueladora</i>	32,47%	32,55%	32,88%	33,14%	33,13%	33,00%	32,95%	33,15%	32,86%	32,92%
<i>Utilización de máquina Acabados Finales</i>	34,14%	33,90%	34,10%	34,49%	34,02%	34,57%	34,20%	34,50%	34,01%	34,77%

b. Simulación Mejorada

ANEXO 2. Simulaciones complementarias para alcanzar el tamaño muestral adecuado

Descripción	SIMULACION N CASO INICIAL					
	Sim.11	Sim. 12	Sim. 13	Sim. 14	Sim. 15	Sim. 16
<i>Utilización de Máquina Cortadora 1</i>	36,97%	34,79%	36,96%	30,70%	37,90%	35,80%
<i>Utilización de Máquina Cortadora 2</i>	43,15%	43,35%	47,97%	45,65%	48,84%	51,33%
<i>Utilización de Máquina Cosedora</i>	99,79%	99,46%	100,33%	99,95%	99,60%	99,69%
<i>Ocupación de Operario de Bisutería</i>	26,90%	26,86%	27,19%	27,14%	26,93%	26,80%
<i>Utilización de Hormadora</i>	66,67%	67,37%	67,46%	67,41%	67,26%	67,42%
<i>Utilización de Ensueladora</i>	32,97%	33,12%	33,27%	33,03%	32,90%	32,82%
<i>Utilización de máquina Acabados Finales</i>	34,24%	34,19%	34,46%	34,54%	33,71%	34,28%

a. Caso Inicial

Descripción	SIMULACION N CASO MEJORADO					
	Sim.11	Sim. 12	Sim.13	Sim.14	Sim.15	Sim.16
<i>Utilización de Máquina Cortadora</i>	74,92%	79,27%	86,15%	66,97%	83,38%	76,30%
<i>Utilización de Máquina Cosedora</i>	99,70%	100,19%	100,33%	100,23%	100,24%	100,02%
<i>Ocupación de Operario de Bisutería</i>	20,27%	22,49%	25,02%	21,05%	25,61%	21,63%
<i>Utilización de Hormadora</i>	67,14%	67,77%	67,23%	68,58%	66,33%	68,24%
<i>Utilización de Ensueladora</i>	33,12%	33,08%	33,10%	33,39%	32,94%	33,50%
<i>Utilización de máquina Acabados Finales</i>	34,35%	34,31%	34,23%	34,77%	34,11%	34,68%

b. Caso Mejorado

ANEXO 3. Número de zapatos fabricados en una jornada laboral

Descripción por Simulación	Caso Inicial	Caso Mejorado
1	128	127
2	130	127
3	128	129
4	129	128
5	127	129
6	130	128
7	129	128
8	127	128
9	129	128
10	127	128
<i>Promedio</i>	128,400	128,000
<i>Desviación Estándar</i>	1,174	0,667
<i>Número De Corridas</i>	0,023	0,007

ANEXO 4. Ejemplo de Simulación Caso Inicial

		T1		T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
T(Horas)	T (Segundos)	Tipo de Diseño	Hora de llegada siguiente orden	Tiempo de Inicio de corte en máquina 1	Tiempo de Inicio de corte en máquina 2	Terminar corte en máquina 1	Terminar corte en máquina 2	Tiempo de Inicio de union de piezas	Terminar union de piezas	Iniciar colocación de bisutería	Terminar colocación de bisutería	Iniciar hormado	Terminar hormado	Iniciar ensuelado	Terminar ensuelado	Iniciar acabados finales	Terminar acabados finales
0	0	1	0,00	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000
0	0,00	1	287,79	0	200000	200000,00	200000,00	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000
0	0,00	1	287,79	200000	200000	87,38	200000,00	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000
0,02427177	87,38	1	287,79	200000	200000	200000,00	200000,00	87,3783607	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000
0,02427177	87,38	1	287,79	200000	200000	200000,00	200000,00	200000	287,428638	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000
0,07984129	287,43	1	287,79	200000	200000	200000,00	200000,00	200000	200000	287,4286383	200000	200000	200000	200000	200000	200000	200000
0,07984129	287,43	1	287,79	200000	200000	200000,00	200000,00	200000	200000	200000	350,9122509	200000	200000	200000	200000	200000	200000
0,07994057	287,79	2	518,77	287,786052	200000	200000,00	200000,00	200000	200000	200000	350,9122509	200000	200000	200000	200000	200000	200000
0,07994057	287,79	2	518,77	200000	200000	372,37	200000,00	200000	200000	200000	350,9122509	200000	200000	200000	200000	200000	200000
0,09747563	350,91	2	518,77	200000	200000	372,37	200000,00	200000	200000	200000	200000	350,912251	200000	200000	200000	200000	200000
0,09747563	350,91	2	518,77	200000	200000	372,37	200000,00	200000	200000	200000	200000	200000	497,963521	200000	200000	200000	200000
0,10343732	372,37	2	518,77	200000	200000	200000,00	200000,00	372,374353	200000	200000	200000	200000	497,963521	200000	200000	200000	200000
0,10343732	372,37	2	518,77	200000	200000	200000,00	200000,00	200000	586,820184	200000	200000	200000	497,963521	200000	200000	200000	200000
0,1383232	497,96	2	518,77	200000	200000	200000,00	200000,00	200000	586,820184	200000	200000	200000	200000	497,9635206	200000	200000	200000
0,1383232	497,96	2	518,77	200000	200000	200000,00	200000,00	200000	586,820184	200000	200000	200000	200000	200000	570,158775	200000	200000
0,14410412	518,77	2	673,37	200000	518,774828	200000,00	200000,00	200000	586,820184	200000	200000	200000	200000	200000	570,158775	200000	200000
0,14410412	518,77	2	673,37	200000	200000	200000,00	636,17	200000	586,820184	200000	200000	200000	200000	200000	570,158775	200000	200000
0,15837744	570,16	2	673,37	200000	200000	200000,00	636,17	200000	586,820184	200000	200000	200000	200000	200000	200000	570,158775	200000

a. Transiciones

P1					P2	P3	P4	P5	P6			P7	P8		
<i>Token con Diseño Rapido y Con Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Rapido y Sin Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Lento y Con Bisutería</i>	<i>Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería</i>	TOTAL	<i>Disponibilidad de máquina cortadora 1</i>	<i>Ocupación de máquina cortadora 1</i>	<i>Disponibilidad de máquina cortadora 2</i>	<i>Ocupación de máquina cortadora 2</i>	<i>Token con Diseño Rapido y Con Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Lento y Con Bisutería</i>	<i>Cola de productos esperando por ser unidos</i>	<i>Disponibilidad de máquina cocedora</i>	<i>Token con Diseño Rapido y Con Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Lento y Con Bisutería</i>	<i>Ocupación de máquina cocedora</i>
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1

b. Lugares

P9			P10	P11			P12			P13	P14			P15			P16	P17		
Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Cola de espera de productos que ya fueron unidos	Disponibilidad de operario de Bisutería	Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Ocupación de operario de bisutería	Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Cola de productos en espera de ser hormados	Disponibilidad de máquina hormadora	Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Ocupación de máquina hormadora	Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Cola de productos en espera de ser ensuelados	Disponibilidad de máquina ensueladora	Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Ocupación de máquina ensueladora
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

c. Lugares

<i>P18</i>			<i>P19</i>	<i>P20</i>			<i>P21</i>		
<i>Token con Diseño Rapido y Con Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Lento y Con Bisutería</i>	<i>Cola de productos en espera de los acabados finales</i>	<i>Disponibilidad de máquina de acabados finales</i>	<i>Token con Diseño Rapido y Con Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Lento y Con Bisutería</i>	<i>Ocupación de máquina de acabados finales</i>	<i>Token con Diseño Rapido y Con Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Lento y Con Bisutería</i>	<i>Almacén de producto terminado</i>
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

d. Lugares

ANEXO 5. Ejemplo de Simulación Caso Mejorado

T (Horas)	T (Segundos)	T1			T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14
		Tipo de Diseño	Tipo de Bisutería	Hora de llegada siguiente orden	Tiempo de Inicio de corte en máquina 1	Terminar corte en máquina 1	Tiempo de Inicio de union de piezas	Terminar union de piezas	Trasladar calzados que no llevan bisutería	Iniciar colocación de bisutería	Terminar colocación de bisutería	Iniciar hormado	Terminar hormado	Iniciar ensuelado	Terminar ensuelado	Iniciar acabados finales	Terminar acabados finales
0,0	0,0	2,0	2,0	0,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,0	0,0	1,0	2,0	277,0	0,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,0	0,0	1,0	2,0	277,0	200000,0	128,8	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,0	128,8	1,0	2,0	277,0	200000,0	200000,0	128,8	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,0	128,8	1,0	2,0	277,0	200000,0	200000,0	200000,0	342,1	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,1	277,0	1,0	1,0	471,5	277,0	200000,0	200000,0	342,1	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,1	277,0	1,0	1,0	471,5	200000,0	357,4	200000,0	342,1	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,1	342,1	1,0	1,0	471,5	200000,0	357,4	200000,0	200000,0	342,1	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,1	342,1	1,0	1,0	471,5	200000,0	357,4	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	342,1	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,1	342,1	1,0	1,0	471,5	200000,0	357,4	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	499,3	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,1	357,4	1,0	1,0	471,5	200000,0	200000,0	357,4	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	499,3	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,1	357,4	1,0	1,0	471,5	200000,0	200000,0	200000,0	582,5	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	499,3	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,1	471,5	1,0	1,0	531,6	471,5	200000,0	200000,0	582,5	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	499,3	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,1	471,5	1,0	1,0	531,6	200000,0	562,6	200000,0	582,5	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	499,3	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,1	499,3	1,0	1,0	531,6	200000,0	562,6	200000,0	582,5	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	499,3	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0
0,1	499,3	1,0	1,0	531,6	200000,0	562,6	200000,0	582,5	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	574,5	200000,0	200000,0
0,1	531,6	1,0	2,0	580,6	200000,0	562,6	200000,0	582,5	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	574,5	200000,0	200000,0
0,2	562,6	1,0	2,0	580,6	562,6	200000,0	200000,0	582,5	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	574,5	200000,0	200000,0
0,2	562,6	1,0	2,0	580,6	200000,0	652,4	200000,0	582,5	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	200000,0	574,5	200000,0	200000,0

a. Transiciones

P1					P2	P3					P4					P5
<i>Token con Diseño Rapido y Con Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Rapido y Sin Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Lento y Con Bisutería</i>	<i>Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería</i>	<i>TOTAL</i>	<i>Disponibilidad de máquina cortadora 1</i>	<i>Token con Diseño Rapido y Con Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Rapido y Sin Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Lento y Con Bisutería</i>	<i>Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería</i>	<i>Ocupación de máquina cortadora 1</i>	<i>Token con Diseño Rapido y Con Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Rapido y Sin Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Lento y Con Bisutería</i>	<i>Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería</i>	<i>Cola de productos esperando por ser unidos</i>	<i>Disponibilidad de máquina cocedora</i>
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0
0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

b. Lugares

P6					P7					P8	P9			P10					P11
Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Rapido y Sin Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería	Ocupación de máquina cocedora	Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Rapido y Sin Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería	Cola de espera de productos que ya fueron unidos	Disponibilidad de operario de Bisutería	Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Ocupación de operario de bisutería	Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Rapido y Sin Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería	Cola de productos en espera de ser hormados	Disponibilidad de máquina hormadora
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

c. Lugares

P12					P13					P14	P15					P16					P17
Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Rapido y Sin Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería	Ocupación de máquina hormadora	Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Rapido y Sin Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería	Cola de productos en espera de ser ensuelados	Disponibilidad de máquina ensueladora	Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Rapido y Sin Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería	Ocupación de máquina ensueladora	Token con Diseño Rapido y Con Bisutería	Token con Diseño Rapido y Sin Bisutería	Token con Diseño Lento y Con Bisutería	Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería	Cola de productos en espera de los acabados finales	Disponibilidad de máquina de acabados finales
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

d. Lugares

<i>P18</i>					<i>P19</i>				
<i>Token con Diseño Rápido y Con Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Rápido y Sin Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Lento y Con Bisutería</i>	<i>Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería</i>	<i>Ocupación de máquina de acabados finales</i>	<i>Token con Diseño Rápido y Con Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Rápido y Sin Bisutería</i>	<i>Token con Diseño Lento y Con Bisutería</i>	<i>Token Con Diseño Lento y Sin Bisutería</i>	<i>Almacén de producto terminado</i>
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

e. Lugares