



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

CENTRO DE GESTIÓN DE POSGRADOS

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

I PROMOCIÓN

**TEMA: DESARROLLO DE UN SIMULADOR DE SISTEMAS DE
MANUFACTURA CON INTERFAZ GRÁFICA BASADO EN
REDES DE PETRI**

AUTOR: ING. GARCÍA AUCATOMA, EDWIN LEONARDO

DIRECTOR: ING. ESCOBAR CARVAJAL, LUIS FERNANDO

SANGOLQUÍ

2017



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

CERTIFICADO

ING. LUIS FERNANDO ESCOBAR CARVAJAL

CERTIFICA

En calidad de director del trabajo de grado, titulado, "DESARROLLO DE UN SIMULADOR DE SISTEMAS DE MANUFACTURA CON INTERFAZ GRÁFICA BASADO EN REDES DE PETRI", presentado por el señor ING. EDWIN LEONARDO GARCÍA AUCATOMA con cédula de identidad N° 1712545985, requisito previo para la obtención del título de MAGISTER EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADOR, I Promoción, fue desarrollada bajo mi dirección y asesoría. La misma que cumple con los requerimientos científicos, tecnológicos y académicos, razón por la cual autorizo su presentación y defensa.

Sangolquí, 4 de Noviembre del 2016

Ing. Luis Fernando Escobar Carvajal

DIRECTOR



VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR COMPUTADOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, ING. EDWIN LEONARDO GARCÍA AUCATOMA, con cédula de identidad N° 1712545985 declaro que este trabajo de titulación "DESARROLLO DE UN SIMULADOR DE SISTEMAS DE MANUFACTURA CON INTERFAZ GRÁFICA BASADO EN REDES DE PETRI", ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como se ha respetando derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 4 de Noviembre de 2016



Ing. Edwin Leonardo García Aucatoma
C.C.: 1712545985



**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA**

**MAESTRÍA EN MANUFACTURA Y DISEÑO ASISTIDOS POR
COMPUTADOR**

AUTORIZACIÓN

Yo, ING. EDWIN LEONARDO GARCÍA AUCATOMA, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE publicar en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de grado denominado, "DESARROLLO DE UN SIMULADOR DE SISTEMAS DE MANUFACTURA CON INTERFAZ GRÁFICA BASADO EN REDES DE PETRI", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 4 de Noviembre de

2016

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized initials and a surname, is written above a horizontal line.

Ing. Edwin Leonardo García Aucatoma

C.C.: 1712545985

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mi familia con especial afecto a las dos personas que hicieron todo lo posible para que yo pudiera alcanzar mis metas y sueños, a mi madre y a mi padre por haberme brindado su apoyo y por todos los sacrificios dados a través de este largo camino y durante toda mi vida.

Lo dedico a un angelito, mi muñeca preciosa, la favorita de la familia que aunque ya no está con nosotros es la luz de mi camino, se lo dedico por ser mi fuerza porque me enseñó a ser fuerte y luchar en la vida hasta el final.

Ing. Edwin Leonardo García Aucatoma

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme dado la fuerza necesaria para seguir adelante

A mi madre, por ser la persona más especial de mi vida, por la inmensidad de tu amor, por todos los sacrificios realizados y por estar en esos momentos difíciles brindándome tus palabras de aliento y tus incansables cuidados.

A mi padre, por ser un ejemplo a seguir por todas las enseñanzas de vida, por el amor brindado día a día, gracias a él sé que la responsabilidad se la debe vivir como un compromiso de dedicación y esfuerzo.

Un especial agradecimiento a mi Director de Tesis Ing. Luis Fernando Escobar Carvajal por sus consejos y su amistad.

Ing. Edwin Leonardo García Aucatoma

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO 1.....	1
ESTADO DEL ARTE	1
1.1. Problema	1
1.1.1. Desarrollo del Problema.....	1
1.1.2. Planteamiento del Problema.....	2
1.1.3. Formulación del problema a resolver.....	3
1.2. Justificación e Importancia	3
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo General:	5
1.3.2. Objetivos Específicos:.....	5
1.4. Hipótesis.....	5
CAPÍTULO 2.....	6
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN	6
2.1. Enfoque de la simulación	6

2.1.1. Introducción a la simulación	6
2.1.2. Ventajas.....	6
2.1.3. Desventajas	7
2.2. Sistemas de Manufacturas Flexibles	8
2.2.1. Definición.....	8
2.2.2. Características de FMS	8
2.2.3. Tipos de flexibilidad de fabricación.....	9
2.3. Tipos de Sistemas de Manufactura	10
2.3.1. Tipos de Operaciones Realizadas.....	11
2.3.2. El Número de Estaciones de Trabajo y Layout.....	11
2.3.3. Automatización en el Esquema de Clasificación	12
2.3.4. Clasificación por Variedad de Partes o Productos	13
2.4. Redes de Petri.....	14
2.4.1. Fundamentos	14
2.4.2. Modelo de FMS con Redes de Petri.....	16
2.4.3. Tipos de Redes de Petri.....	16
2.4.4. Redes de Petri Generalizadas (RPG).....	18
2.4.5. Redes de Petri con capacidad limitada (RCP).....	18
2.4.6. Redes de Petri con transiciones no estándar	19
2.4.7. Redes de Petri con arcos inhibidos (RPAI).....	19
2.4.8. Redes de Petri Coloreadas.....	19
2.4.9. Redes de Petri Temporizadas	20
CAPÍTULO 3.....	21
DEFINICIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	21
3.1. Problema	21

3.2. Limitaciones	22
3.2.1. Investigación de Operaciones	22
3.2.1.1 Programación Lineal	22
3.2.1.2. Programación Entera	23
3.2.1.3. Solución de Programación Entera	23
3.2.1.4. Programación Dinámica	24
3.2.2. Inteligencia Artificial	24
3.2.3. Solución por Simulación	24
3.3. Simulación con Redes de Petri	25
3.3.1. Redes de Petri para Máquina y Robot (Manipulador)	25
3.3.2. Red de Petri para Buffer	26
3.3.3. Red de Petri para Simulador	27
3.4. Interfaz Gráfica	29
3.4.1. Bloque de Ingreso de Elementos	31
3.4.2. Bloque de Listas de Elementos	33
3.4.3. Bloque Área de Trabajo	34
3.4.4. Bloque Visualización de Datos	36
3.4.4. Bloque de Simulación	37
CAPÍTULO 4.....	38
IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	38
4.1. Descripción del Software	38
4.1.1. Hilos o Threads	39
4.1.2. Clases Relacionadas con Hilos.....	40
4.1.2. Creación de Hilos.....	41
4.2. Diagrama de Flujo.....	42

4.3. Modelado de un FMS.....	45
CAPÍTULO 5.....	51
RESULTADOS.....	51
5.1. Resolución Caso de Estudio.....	51
5.2. Resultados de la Simulación	54
5.3. Análisis de las Simulaciones	58
CAPÍTULO 6.....	65
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
6.1. CONCLUSIONES	65
6.2. RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseños de Planta utilizados en Sistemas de Producción	12
Figura 2. Representación Red de Petri	15
Figura 3. Representación de FMS con RdP	16
Figura 4. Redes de Petri para Máquina y Robot	26
Figura 5. Red de Petri para Buffer	27
Figura 6. Red de Petri para Simulador	28
Figura 7. Pantalla de Carga	29
Figura 8. Menú	30
Figura 9. Interfaz Gráfica	30
Figura 10. Bloque Ingreso de Elementos	31
Figura 11. Modificación de Elementos	31
Figura 12. Conexiones	32
Figura 13. Bloque Lista Elemento	33
Figura 14. Bloque Lista Elemento	33
Figura 15. Propiedades Máquina.....	34
Figura 16. Propiedades Manipulador	34
Figura 17. Propiedades de Entrada.....	35
Figura 18. Modificación Propiedades Entrada.....	35
Figura 19. Bloque Visualización de Datos.....	36
Figura 20. Lista Máquina	36
Figura 21. Lista Manipulador.....	37
Figura 22. Lista Entrada.....	37
Figura 23. Bloque de Simulación.....	37
Figura 24. Diagrama de Uso Simulador Gráfico	38

Figura 25. Relación entre Hilos y Procesos	40
Figura 26. Diagrama de Flujo para Simulador Gráfico.....	44
Figura 27. Diagrama de Bloques de Modelo	45
Figura 28. Ingreso de Elementos para Modelado.....	46
Figura 29. Conexiones para el Modelo	46
Figura 30. Ingreso de número de productos.....	46
Figura 31. Configuración Máquinas	47
Figura 32. Visualizar Datos Máquina	47
Figura 33. Configuración Manipulador	48
Figura 34. Propiedades Entrada	48
Figura 35. Configuración Entrada.....	49
Figura 36. Proceso Transporte	50
Figura 37. Proceso Máquina	50
Figura 38. Diferenciación por colores.....	50
Figura 39. Modelo del Caso de Estudio	52
Figura 40. Secuencias del Modelo	52
Figura 41. Tiempo de Procesamiento por Unidad	53
Figura 42. Proceso de Producción.....	54
Figura 43. Tiempo Final de Simulación.....	55
Figura 44. Makespan por Lote	60
Figura 45. Utilización de Máquinas para Lote 1	62
Figura 46. Utilización de Máquinas para Lote 2.....	62
Figura 47. Utilización de Máquinas para Lote 3.....	63
Figura 48. Utilización de Máquinas para Lote 4.....	63
Figura 49. Utilización de Máquinas para Lote 5.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Extensiones de las Redes de Petri	17
Tabla 2. Datos del Problema	51
Tabla 3. Tiempos de Lotes	55
Tabla 4. Tiempos para Máquinas	56
Tabla 5. Diagrama de Gantt Simulador Gráfico	58
Tabla 6. Tiempos de Producción por Lote	60

RESUMEN

Esta investigación desarrolla ideas en la aplicación de modelos de Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS) que pueden ser simulados como sistemas de eventos discretos (SED), ya que los SED tienen por finalidad identificar a sistemas en los que los eventos que cambian el estado del mismo ocurren en instantes específicos en el tiempo. Aunque aparentemente simples, los sistemas de eventos discretos, pueden modelar muchos de los fenómenos a los que se enfrentan los procesos productivos de una empresa por lo cual se propone el desarrollo de un simulador con una interfaz gráfica programada en lenguaje Java sustentado en Redes de Petri para representar la dinámica de los sistemas y usarlo como una herramienta para la incidencia en la productividad y competitividad de las empresas en el mercado, facilitando el análisis de los recursos, planificación y evaluar los tiempos acumulados de procesos en el sistema. La contribución de un software de simulación corresponde a una mejora de la calidad sistémica que permite obtener productos en forma ágil, a un costo razonable y optimizando los recursos.

Palabras Clave:

- **SIMULADOR**
- **INTERFAZ**
- **GRÁFICA**
- **REDES DE PETRI**
- **FMS**
- **HILOS JAVA.**

ABSTRACT

This research develops ideas in the application of Discrete Event Systems (DES) simulation software for the optimization of Flexible Manufacturing Systems (FMS), the DES have intent to identify systems in which events change in a discrete manner one after another, in specific instants of time. Although seemingly simple, DES can model many phenomena one application is the productive process of a company for which the proposed development of a Simulator with a graphical interface programmed in Java, supported by Petri Nets for represent the dynamic behavior of systems and use it as a tool for influencing productivity and competitiveness of manufacturing companies, facilitating analysis of resources, planning and evaluate different metrics related with production times in the system. The contribution of simulation software corresponds to an improvement for systemic quality that allows companies to obtain products at a reasonable cost, with increased flexibility and moreover optimizing resources.

Keywords:

- **SIMULATOR**
- **GRAPHICAL INTERFACE**
- **PETRI NETS**
- **FMS**
- **JAVA THREADS.**

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE

1.1. Problema

En este capítulo se presenta de manera general, el problema de programación de producción para Sistemas de Manufactura Flexible combinados con las ventajas de modelado de las Redes de Petri.

1.1.1. Desarrollo del Problema

En diversos sectores productivos, la programación de actividades es de gran importancia en la incidencia de la productividad y competitividad de las empresas en el mercado, por lo cual es fundamental que las empresas del sector productivo se acoplen al mercado cambiante, en este contexto, las empresas se ven en la necesidad de contar con una programación de la producción efectiva. Los sectores productivos deben tener la capacidad de competir y una de las formas para lograrlo es la producción por FMS (acrónimo en inglés de Flexible Manufacture System) o Sistema de Manufactura Flexible siendo una gran promesa para el futuro ofreciendo beneficios en la calidad de los productos, reducción de costos y un mejor manejo en los procesos.

Una oportunidad de investigación, es la planificación de la producción de los sistemas FMS por su nivel de dificultad, al tener que adaptarse rápidamente a los cambios para producir una gran variedad de clases de productos en pequeñas y medianas cantidades, para lo cual es importante encontrar una herramienta de simulación que describa apropiadamente sus características y permita modelar fácilmente dichos sistemas.

Basados en estas consideraciones y en investigaciones previamente realizadas como el *Desarrollo de un Simulador Didáctico de Redes de Petri de Bajo Nivel*, Hernández F., (2016), el cual considera el desarrollo de un programa de cómputo funcional que, comparado con otras herramientas gráficas, brinda la posibilidad de comprender la evolución del estado de la Red de

Petri bajo la perspectiva matemática y el *Modelo de un Sistema de Producción Esbelto con Redes de Petri para Apoyar la Toma de Decisiones* Varela, (2015), el cual plantea la integración del pensamiento esbelto en la gestión de un sistema de producción mediante la técnica de simulación de eventos discretos empleando Redes de Petri como metodología de apoyo de procesos de toma de decisiones considerando las características estáticas (estructurales) y dinámicas enfocados en proceso productivo de neumáticos, se puede comprender que el estudio de la creación una herramienta de simulación gráfica es de gran relevancia permitiendo llevar a cabo el modelado de sistemas FMS de fácil uso para el usuario final y obtener mejores resultados en menor tiempo.

1.1.2. Planteamiento del Problema

En la simulación y análisis de FMS sería útil el uso de un Software de Simulación Gráfico enfocado en el usuario final permitiendo reducir el nivel de complejidad de modelamiento de los sistemas sin la necesidad que el usuario requiera de conocimientos medios o avanzados de programación e ingeniería en procesos de manufactura, para lo cual se emplea un método como las Redes de Petri (RdP) el cual es usado en varias aplicaciones para modelar y describir el comportamiento de sistemas dinámicos discretos tratando de que su representación sea lo más cercana a la realidad.

Según Varela, 2015 este tipo de investigaciones aportan en obtener soluciones a distintos sistemas de producción a través de Redes de Petri híbridas, identificando los diferentes tipos de relación que pueden establecerse entre los elementos y la sensibilidad que las variables tienen mediante la interacción y evolución del tiempo, también Soto (2010) en su investigación no dice que una forma de estudiar un sistema de manufactura flexible es por medio de un modelo del sistema y someterlo a un simulacro para observar sus índices de comportamiento, gráficas, etc.

1.1.3. Formulación del problema a resolver

1. ¿Se podría simular cualquier tipo de Sistema de Manufactura Flexible con ayuda del Software de Simulación basado en Redes de Petri?.

2. ¿Se podrá usar como base el Código Abierto del Software de Simulación Gráfica para la mejora continua del mismo?.

3. ¿Qué beneficios presentará el desarrollo de un Software de Simulación Gráfico para los FMS en la Industria Manufacturera del Ecuador?

Así, el problema científico de la presente investigación es:

¿Cómo simular el funcionamiento de los Sistemas de FMS mediante Redes de Petri al considerar los aspectos operacionales de la actividad de manufactura, que contribuya a ofrecer una respuesta dinámica a las necesidades del mercado ecuatoriano?

Queda definido como el *Objeto de la Investigación* los FMS y su *Campo de Acción*, la simulación para modelar el funcionamiento de los FMS mediante Redes de Petri.

1.2. Justificación e Importancia

Existen varias investigaciones que hablan sobre Eventos Discretos para Sistemas de Manufactura basados en Redes de Petri como en el trabajo de (Z. Daxin, 2010), con el título “*Modeling and Scheduling of Real-life Assembly Job Shop with Timed Colored Petri Net*”, el cual analiza el conjunto de requisitos de una zona de trabajo para la programación de tiempo real utilizando Redes de Petri Coloreadas y Cronometradas con reglas heurísticas reduciendo el makespan¹ y asegurando la forma de producción estable y sin problemas, otro autor (H. HeSuan, 2013) trata en su investigación “*Supervisor Synthesis and Performance Improvement for Automated Manufacturing System by Using Petri Nets*”, donde se centran en el comportamiento inadecuado de los Sistemas de Manufactura Automatizados y eliminar el tiempo de inactividad como un solo tema por lo cual el uso de Redes de Petri es crucial para

¹ Makespan: diferencia de tiempo entre el inicio y el final de una secuencia de trabajo o tareas.

optimizar ciertas prioridades locales en busca de mejora de tiempo de ciclo o máximo rendimiento, manejando un algoritmo polinomial complejo para derivar la supervisión.

Otras investigaciones como *“Supervisor Desing and Simplification for Automated Manufacturing System Using Colored Petri Nets”*, su autor (H. HeSuan, 2015), usa las Redes de Petri para condensar y sintetizar problemas de fabricación reduciendo la solución de operaciones con matrices distinguiendo en las matrices las variables independientes y eliminando las variables dependientes con cual este método reduce significativamente los costes, aumenta la fiabilidad y mejora rendimiento, la investigación de autor (G. Mata, 2016), en su trabajo *“Análisis de Sistemas de Manufactura conteniendo una exclusión mutua usando Redes de Petri”* establece técnicas de análisis novedosas con una exclusión mutua el cual construye una Red de Petri cuya estructura y marcación inicial garanticen acotamiento, sin bloqueo y reiniciabilidad según las especificaciones o requerimientos para el sistema.

Se pretende desarrollar un Software de Simulación en base a la teoría de Redes de Petri para obtener una herramienta de análisis, diseño y modelación de FMS, los cuales se han enfrentado cada vez más a sistemas complejos debido a un entorno cambiante por lo cual aplicar nuevas teorías y métodos se ha hecho una tarea constante para mejorar su desempeño y aplicabilidad, en este caso se plantea el desarrollo de un Simulador Gráfico para racionalizar el uso de los recursos y brindar soluciones a muchos problemas complejos permitiendo una representación completa de los sistemas de manufactura.

En vista de la recolección de información de diferentes investigaciones obtenidas relacionadas con el tema propuesto se puede deducir que los Sistemas de Manufactura Flexible y Redes de Petri son ampliamente estudiados, ya que ayudan a solventar problemas de la industria de producción por lo cual contar con una herramienta de simulación de fácil acceso y uso que ayude a determinar la mejor posibilidad de manejar un proceso industrial y establecer las condiciones necesarias para la implementación de una estrategia de control aportaría al desarrollo de la empresa en el mercado.

1.3. Objetivos

A continuación se declara el objetivo general y los objetivos específicos de la presente investigación.

1.3.1. Objetivo General:

- Desarrollar un Simulador Gráfico para un Sistema de Manufactura Flexible aplicando el método de Redes Petri como herramienta de modelado basado en lenguaje de programación Java.

1.3.2. Objetivos Específicos:

- Investigar el estado del arte sobre la aplicación de modelos clásicos y emergentes para la modelación, simulación y análisis de Sistemas de Manufactura Flexible empleando Redes de Petri.
- Analizar ventajas, limitantes técnicas y operativas de las Redes de Petri para crear un Modelo de un Sistema.
- Diseñar la estructura del Software de Simulación en función de las características técnicas de las Redes de Petri y los Sistemas de Manufactura Flexible
- Obtener un Software de Simulación para Sistemas de Manufactura Flexible amigable para el usuario.
- Analizar los resultados alcanzados al aplicar la herramienta desarrollada diseñando un Modelo de un FMS basado en un Caso de Estudio.

1.4. Hipótesis

El comportamiento de los FMS puede ser modelado gráficamente mediante el método de Redes de Petri dando la posibilidad de mostrar la estructura del proceso, las secuencias de acciones, los recursos a utilizar, reportes y tiempos de producción.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN

2.1. Enfoque de la simulación

La simulación cada vez se vuelve un instrumento necesario en cualquier campo de trabajo por lo cual se destaca su importancia a continuación.

2.1.1. Introducción a la simulación

"Una simulación es una imitación de la operación de un proceso del mundo real sobre determinado tiempo". (M. Azaranga, 2013)

La simulación de procesos a lo largo del tiempo ha permitido resolver cuestiones complejas. Y se puede definir como: *“el proceso de diseñar y desarrollar un modelo de sistema o proceso, y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar estrategias con las cuales se puede operar sobre él”*. (Shannon, 1988)

2.1.2. Ventajas

Dentro de las ventajas podemos encontrar las siguientes:

- La simulación proporciona un control total sobre el tiempo de funcionamiento del modelo de un sistema dando a conocer información del estado de los procesos en una fracción mínima del tiempo real.
- Con los modelos de simulación es posible analizar sistemas complejos con mayor grado de detalle.
- Se pueden probar las diferentes hipótesis acerca de cómo y por qué ocurre cierto fenómeno.

- La simulación contribuye a acelerar y/o mejorar los tiempos en la elaboración de diferentes productos.
- Se puede tener información acerca de la relación entre las variables más importantes de un sistema.
- Permite la experimentación basándose en hechos reales.
- Facilita la colaboración entre los estadísticos y el investigador o científicos con las consiguientes ventajas en el análisis e interpretación de las etapas del programa.

2.1.3. Desventajas

Dentro de las desventajas se considera las siguientes:

- La simulación requiere de mucho tiempo y recursos.
- La adquisición de un Software de Simulación constituye una de las mayores dificultades para una empresa debido a los costos elevados, además se debe considerar: el entrenamiento del personal y la adquisición de datos para la creación de una simulación que representa un costo adicional.
- Se requiere gran cantidad de corridas computacionales para encontrar “soluciones óptimas”.

Se debe contemplar varios factores a la hora de llegar al punto de decisión de ser conveniente o no utilizar algún software de simulación, algunos de estos son: el proceso de obtención del producto final, tipo de industria donde va a ser aplicado, complejidad de los sistemas.

La simulación permite el estudio y la experimentación de las interacciones internas dentro de un sistema complejo, aparte de ser bien reconocida por varias empresas y organizaciones que la emplean hoy en día para mejorar su productividad y obtener una ventaja competitiva en medio de un mundo agresivo de constantes cambios; dentro de sus campos de aplicación tenemos: telecomunicaciones, transporte, energía, salud, economía, fabricación, distribución y logística, hasta procesos de negocios.

2.2. Sistemas de Manufacturas Flexibles

En este punto se tratará los fundamentos de los Sistemas de Manufactura Flexible, que son una de las bases de la teoría planteada para el desarrollo de la investigación.

2.2.1. Definición

Un FMS según (Groove, 1990) “consiste de un grupo de estaciones de procesamiento (predominantemente máquinas herramientas CNC), interconectadas por medio de un sistema de manejo y recuperación de material automático. Lo que da su nombre al FMS es su capacidad de procesar una variedad de diferentes tipos de partes simultáneamente bajo un programa de control NC en varias estaciones”.

Un FMS es una celda de maquinado con tecnología de grupos altamente automatizada que consiste en un grupo de estaciones de procesamiento, interconectadas entre sí mediante un sistema automatizado de manejo y almacenamiento de materiales que a su vez son controlados por un sistema integrado de computadoras.

2.2.2. Características de FMS

La principal característica de un FMS, es su capacidad para procesar múltiples productos con volúmenes de producción diversos brindando gran flexibilidad y adaptabilidad dentro del sistema.

Los factores que intervienen para que el sistema de manufactura sea flexible son principalmente: la capacidad de disminuir o aumentar la cantidad de la producción, el tipo de manufactura y como esta pueda producir con una misma máquina, las diferentes operaciones que reflejan eficiencia en la elaboración de productos y el cliente a quien está enfocado todo el proceso para poder satisfacer su necesidad.

Los beneficios de un FMS son bastante amplios desde el mismo hecho que intensifica el uso de las máquinas de un proceso así como también reduce la cantidad de las mismas, entonces

al disminuir la cantidad de maquinaria se reduce el espacio empleado para el sector de producción, el que puede ser aprovechado dentro de la empresa para otros enfoques. Se logran menores tiempos de entrega al evitar la existencia de los indeseados tiempos muertos o cuellos de botella.

2.2.3. Tipos de flexibilidad de fabricación

A decir de Sethi y Sethi (Sthipal, 1990) se categorizar a la flexibilidad de fabricación en 11 tipos dividida en tres grupos, siendo esta la capacidad del sistema de fabricación para responder a cambios.

Grupo 1: Flexibilidad del Sistema

- **Flexibilidad básica:** Capacidad para adaptar una máquina en el sistema a una amplia gama de tipos de operación y de piezas de producción.
- **Manejo de materiales:** Habilidad para mover varias piezas entre máquinas y áreas de almacenamiento.
- **Operación:** Basado en el diseño del producto, se refiere a la habilidad de usar diferentes operaciones de proceso para producir las características del producto.

Grupo 2: Flexibilidad de Control

- **Flexibilidad en el proceso:** Variedad de partes que puede producir con la misma configuración.
- **Ruta de materiales:** Habilidad para usar diferentes tipos de máquinas u operaciones para producir partes bajo la misma configuración.
- **Producto:** Facilidad de cambiar la producción por un nuevo conjunto de piezas.
- **Volumen:** Facilidad de cambiar el nivel de volumen de producción.
- **Expansión:** Capacidad de agregar capacidad adicional.

Grupo 3: Flexibilidad de Producción:

La flexibilidad del sistema y el sistema de control, se combinan para generar la flexibilidad de Producción.

- **Flexibilidad del programa de producción:** Habilidad para ejecutar las secuencias de operación sin la necesidad de atender el sistema por un largo tiempo.
- **Producción:** Rango de tipos de partes que se pueden producir sin gastos de capital importantes.
- **Mercado:** Combinación de producto, proceso, volumen y expansión.

2.3. Tipos de Sistemas de Manufactura

Existen cuatro factores de clasificación de un sistema de manufactura según (Y.Ramirez, 2014):

1. Por el tipo de operación realizada
 - Operaciones de procesamiento versus operación de ensamble.
 - Tipo de procesamiento u operación de ensamble
2. El número de estaciones de trabajo y el layout
 - Una estación versus más de una estación
 - Para más de una estación, ruteado variable versus ruteado fijo
3. El nivel de automatización
 - Estaciones de trabajo manual o semi-automático que requieren tiempo completo del operador versus completamente automatizada que requiere solamente atención periódica del operador
4. La diversidad de las partes o productos
 - Todas las unidades de trabajo idénticas versus variaciones en las unidades de trabajo que requieren diferencias en procesamiento

2.3.1. Tipos de Operaciones Realizadas

Los sistemas de manufactura se distinguen por los tipos de operaciones que realizan:

- Operaciones de procesamiento sobre unidades de trabajo individuales.
- Operaciones de ensamble para combinar partes individuales en entidades ensambladas.

Otros parámetros adicionales del producto que tienen un rol importante en el diseño del sistema de manufactura son: El tipo de material, tamaño y peso de la parte o producto y la geometría, de acuerdo a la geometría las partes maquinadas se pueden clasificar en: rotacionales y no rotaciones. (Díaz, 2011)

Las partes rotacionales son cilindros o en forma de disco y requieren torneado y operaciones relacionadas a la rotación, mientras que las partes no rotacionales o prismáticas son de forma rectangular o cúbicas, requieren fresado y operaciones relacionadas para darles forma. Esta diferenciación define la forma en que el material será manejado en el sistema de manufactura.

2.3.2. El Número de Estaciones de Trabajo y Layout

El número de estaciones de trabajo es un factor clave en el esquema de clasificación, ya que tiene una gran influencia en el rendimiento del sistema de manufactura en términos de capacidad de producción, productividad, costo por unidad y mantenimiento. Al considerar que el número de estaciones es n . Cada estación individual tendrá un identificador i , donde:

$i = 1, 2, \dots, n \Rightarrow$ Esto es importante para identificar los parámetros, operaciones y operadores relacionados con la estación de trabajo i .

Al aumentar el número de estaciones, se mejora los tiempos de espera (lead time)² enfocado en la aplicación de la técnica (Lean manufacturing)³, considerando estaciones de trabajo individuales. Mientras cuanto trabajan en colaboración, el beneficio puede ser aún

² Definición **Sinergia**: procede de un vocablo griego que significa “cooperación”. El concepto es utilizado para nombrar a la acción de dos o más causas que generan un efecto superior al que se conseguiría con la suma de los efectos individuales.

³ Definición **Lead Time**: es el tiempo que un producto requiere para ser producido, es decir desde que se genera la orden de producción hasta que esté terminado.

mayor (Sinergia⁴). Aunque más estaciones significan mayor complejidad, difícil manejo y mantenimiento, costos, etc.

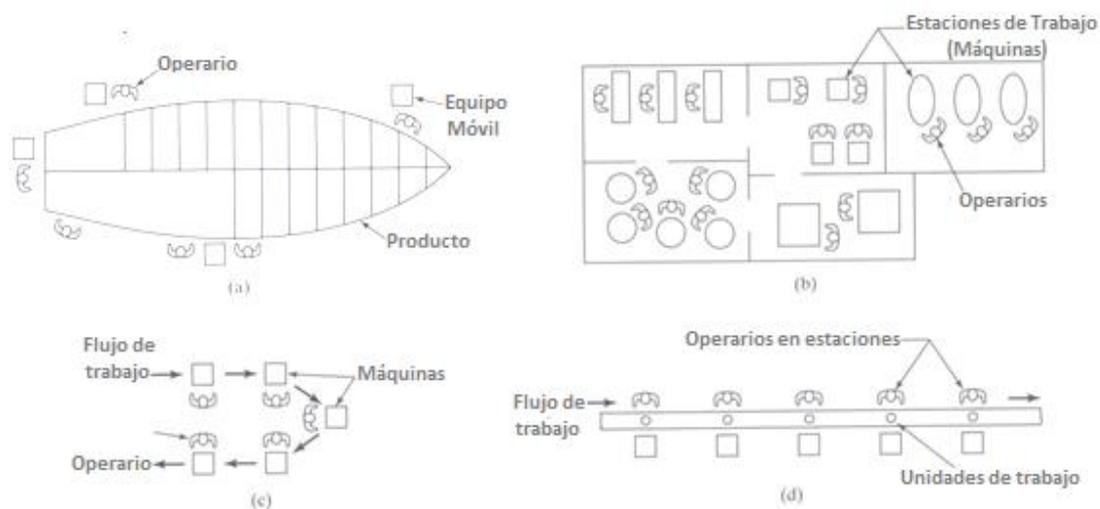


Figura 1.

Diseños de Planta utilizados en Sistemas de Producción

Layouts de estaciones de trabajo se organizan para rutas variables con diversas configuraciones; mientras que los layouts también pueden organizarse para rutas fijas y se arreglan linealmente como en una línea de producción. El layout define como se van a manejar los materiales. (Figura 1). (Groover, 2002)

2.3.3. Automatización en el Esquema de Clasificación

En los sistemas de manufactura hay dos niveles posibles de automatización para una estación sencilla manual (M) o completamente automatizada (A), donde la estación manual es aquella en la que uno o más operadores deben estar presentes en cada ciclo ($M \geq 1$) y una estación completamente automatizada es aquella que requiere menos del tiempo completo de la atención de un trabajo ($M < 1$).

Para estaciones múltiples los niveles M y A son aplicables, y un tercer nivel es posible: H = híbrido, en el cual algunas estaciones son manuales y otras completamente automatizadas.

⁴ Definición **Lean Manufacturing**: consiste en la ejecución continua y habitual de un grupo de herramientas o técnicas de fabricación con el objetivo de mejorar los procesos gracias a la reducción de desperdicios.

2.3.4. Clasificación por Variedad de Partes o Productos

Un factor que caracteriza a un sistema de manufactura es el grado en el cual es capaz de lidiar con variaciones en las partes o productos que produce. Una clara ejemplificación de posibles variaciones para un sistema de manufactura son:

- Variaciones en el tipo y/o color de las partes plásticas moldeadas en un inyector.
- Variaciones en componentes electrónicos colocados sobre un circuito impreso estándar.
- Variaciones en el tamaño de circuitos impresos manejados por una máquina colocadora de componentes.
- Variaciones en la geometría de partes de máquinas.
- Variaciones en partes y opciones en un producto ensamblado sobre una línea final ensamble.

2.3.4.1. Modelo Simple

Todas las partes o productos hechos por el sistema de manufactura son idénticas, no hay variaciones. En este caso, la demanda por un elemento debe ser suficiente para justificar un sistema dedicado de producción que haga un componente por un periodo extendido de tiempo. El equipo asociado con el sistema es especializado y diseñado para la mayor eficiencia.

2.3.4.2. Modelo de lotes

Es la producción de grandes cantidades de partes o productos que requiere una configuración completa de la instalación física y de programación del equipo para cada lote, se caracteriza por una cuidadosa organización de flujo de materiales a través de varias etapas de fabricación.

2.3.4.3. Modelo Mixto

Diferentes partes o productos son hechos por el sistema de manufactura, pero el sistema puede manejar estas diferencias sin la necesidad de un cambio completo en la configuración física o el programa. Esto significa que la mezcla de diferentes estilos pueden producirse en lugar de por lotes.

Los requisitos para la producción continua de diferentes estilos de unidades de trabajo es que el sistema de manufactura debe ser diseñado de forma que cualquier ajuste que sea necesario de una parte o producto a otro, sea hecho rápidamente y económicamente variable el hacer una sola unidad.

2.4. Redes de Petri

Las Redes de Petri fueron introducidas para la modelación de sistemas discretos y poder visualizar su comportamiento y de ésta manera determinar propiedades importantes en su evolución y poder analizarlas.

2.4.1. Fundamentos

Las Redes de Petri (RdP) (C.A. Petri, 1962) son una herramienta de modelado muy efectiva para la representación y el análisis de procesos concurrentes. Modelar un sistema usando Redes de Petri tiene tres ventajas potenciales: 1) El sistema completo es a menudo más fácil de entender debido a la naturaleza gráfica y precisa del esquema de representación. 2) El comportamiento del sistema puede ser analizado utilizando la teoría de las redes de Petri, que incluye herramientas para el análisis tales como los árboles enmarcados y establece relaciones entre ciertas estructuras de redes y el comportamiento dinámico de la Programación Concurrente. Pueden aplicarse también técnicas para la verificación de programas paralelos. 3) Puesto que las redes de Petri pueden sintetizarse usando técnicas "bottom-up" y "top-down", es posible diseñar automáticamente sistemas cuyo comportamiento es conocido o fácilmente verificable. (Granda, 2012).

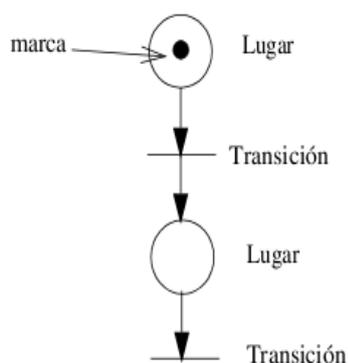


Figura 2. Representación Red de Petri
Fuente: (Granda, 2012)

Las RdP son una clase de grafo dirigido y bipartido, conformado por dos tipos de nodos denominados lugares y transiciones como se observa en la Figura 2. Los lugares representan, por lo general, acciones o condiciones y las transiciones representan eventos. Las plazas y las transiciones se conectan mediante arcos. En las plazas residen entidades llamadas *tokens*⁵, que representan la verdad de la condición o acción asociada con la plaza. El estado de las RdP se determinan por un vector M de enteros no negativos denominado marcaje que contiene el número de tokens que se encuentran en cada sitio de la RdP.

$$PN = 6 - \text{tupla}^6\{P, T, \{TxP\}, \{PxT\}, Mo, W\}$$

Donde:

P: conjunto de plazas de la RdP

T: conjunto de transiciones de la RdP

T x P: conjunto de arcos de salida de las transiciones a las plazas

P x T: conjunto de arcos de entrada de las plazas a las transiciones

Mo: marcaje inicial de la RdP

W: conjunto de pesos asociados a los arcos

⁵Tokens: Puntos negros en esencia (Llevar información a las Redes)

⁶Tupla: Tipo de dato secuencial, sirve para agrupar datos como si fueran un único valor, varios valores.

2.4.2. Modelo de FMS con Redes de Petri

Consiste de un número n de subredes a cíclicas que modelan las relaciones de precedencia de los n trabajos asignados al sistema de manufactura (Zhou, 2005). Los recursos se añaden como plazas temporizadas y no temporizadas: las primeras modelan las operaciones de los trabajos, mientras que las segundas lo hacen con las colas de almacenamiento temporal (*buffers*)⁷ localizadas antes de las estaciones. Las transiciones modelan bien sea el inicio o el fin de una operación. La disponibilidad de las máquinas es modelada mediante plazas sin temporizar. Estas plazas, denominadas de recurso, están conectadas a las transiciones de las subredes de los trabajos y controlan que el correspondiente recurso no pueda estar utilizado por más de una máquina.

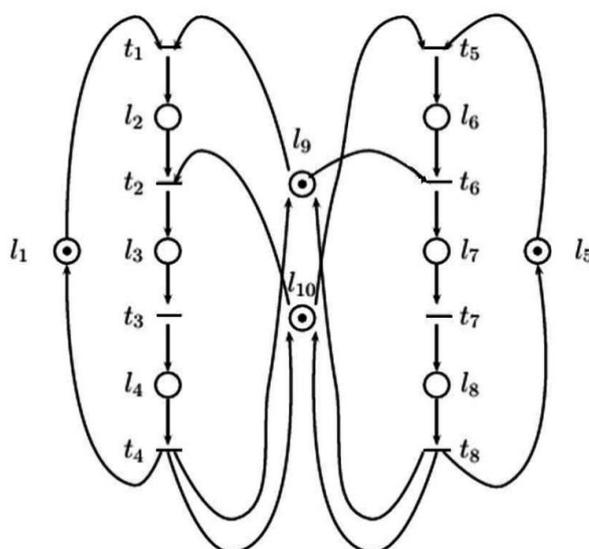


Figura 3. Representación de FMS con RdP
Fuente: (Mata, Méndez, Cardillo, & Chacón, 2016)

2.4.3. Tipos de Redes de Petri

Según Granada, 2012, existen varias extensiones en las redes de Petri para incrementar la potencia de modelado o para conseguir descripciones más condensadas de la herramienta, algunas de las más importantes son:

⁷Buffers: Memoria de almacenamiento temporal de información que permite transferir los datos entre unidades funcionales con características de transferencia diferentes.

- Redes de Petri generalizadas (RPG)
- Redes de Petri con capacidad limitada (RPC)
- Redes de Petri con transiciones no estándar
- Redes de Petri Inhibidores (RPAI)
- Redes de Petri con arcos Coloreadas
- Redes de Petri temporizadas

Tabla 1.

Extensiones de las Redes de Petri

Extensiones Redes de Petri	Concepto
Redes de Petri Generalizadas (RPG)	Son aquellas en las que se introduce un peso en los arcos. Un arco no etiquetado es de valoración unidad.
Redes de Petri con capacidad limitada (RPC)	Son aquellas en la que la capacidad para contener testigos de cada plaza está limitada a un valor máximo. Una transición estará habilitada sólo si en todos los lugares de entrada hay marcas y si el mercado que resulte de su disparo no viola las restricciones de capacidad establecidas.
Red de Petri con transiciones no estándar	Son aquellas en las que se modifica la regla de disparo de las transiciones.
Red de Petri con arcos inhibidos (RPAI)	Es aquella a la que se añaden arcos inhibidores. Un arco inhibidor conecta una plaza a una transición y se representa por una línea que termina con un círculo en la transición.
Red de Petri coloreadas	Son aquellas en las que cada arco de entrada a las transiciones y cada testigo pueden llevar asociado un color diferente. A cada lugar y a cada transición se les asigna un conjunto de colores. Los colores de las marcas pueden ser modificados por el disparo de una transición.
Red de Petri temporizadas	Son Redes de Petri en las que se introduce el tiempo de duración de los eventos. Normalmente, esta extensión se realiza asociado con cada transición un tiempo de disparo.

Fuente: (Guach, 2005)

2.4.4. Redes de Petri Generalizadas (RPG)

Según Huayna, (2009) las RPG son una extensión de las Redes de Petri y eliminan la restricción que establece que el disparo de una transición eliminará un y solo un token de los lugares de entrada y aportará dicho token a los lugares de las salidas de la red. Con la eliminación de esta restricción cada lugar puede tributar o recibir más de un token al dispararse la transición correspondiente.

La representación de la cantidad de tokens que se mueven se hace mediante la ubicación de múltiples arcos entre el lugar y la transición correspondiente, o mediante la señalización del número de tokens sobre un arco resaltado con doble línea.

La existencia de arcos generalizados impone una rectificación en la regla de disparo de una transición. En este caso una transición se dispara cuando la cantidad de tokens en cada posición de entrada sea igual o mayor a la cantidad de arcos entre dicha posición y la transición.

2.4.5. Redes de Petri con capacidad limitada (RCP)

Raimundez, (2012) afirma que la extensión de las Redes de Petri con capacidad limitada tiene una condición de disparo basada en la acumulación de tokens en las entradas dependiendo de la capacidad asignada y a partir de ese momento ya no puede ingresar mas tokens a dicho lugar hasta que cada transición libere todos lo tokens acumulados.

Es inmediato relacionar esta cualidad con la problemática de la gestión de recursos. Los sistemas que requieren una gestión de recursos, evidentemente han de disponer de modelos que sean capaces de incluir en sus diseños información acerca del número de recursos disponibles ante cualquiera de las situaciones que puedan darse. Esta cualidad de limitación es una herramienta muy adecuada para el modelado de sistemas en los que la gestión de recursos se ve alterada de forma constante en función de las necesidades y peticiones que un conjunto de usuarios no controlados realizan sobre el sistema.

2.4.6. Redes de Petri con transiciones no estándar

Esta cualidad permite modelar sistemas capaces de volver a situaciones previsibles y controlar la ocurrencia de estados no deseados, siempre que estos estados estén contemplados en el modelo como tales, otorgando a dichos sistemas cualidades tan deseables como la fiabilidad y la tolerancia a fallos. (Lara, 2012)

2.4.7. Redes de Petri con arcos inhibidos (RPAI)

Cuando se quieren modelar sistemas de prioridades, las Redes de Petri básicas presentan dificultades. Estas se contrarrestan insertando los denominados arcos inhibidores.

Una extensión importante a las Redes de Petri es el arco inhibidor, el cual tiene como característica un pequeño círculo en lugar de una flecha, al final del arco. La condición de disparo de una transición se generaliza diciendo que una transición está habilitada cuando todas sus plazas de entrada unidas a la transición con arcos normales contienen al menos tantos tokens como arcos. (Granda, 2012)

2.4.8. Redes de Petri Coloreadas

Es un tipo de Redes de Petri extendida donde los tokens corresponden a un color determinado. El color del token corresponde a un tipo de dato que tiene asignado el token, pudiendo ser estructuras de datos completas las que se encuentran en cada token. La información alojada en cada token fluye a través del disparo de las transiciones, de acuerdo a la dinámica que se presenta en un sistema real.

“Permite también 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 asociados información que se denominan Colores (equivalen al concepto atributo)”. (Murillo, 2010)

Un claro ejemplo de los atributos asociados a un token que avanza en la secuencia 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: *Red de Petri Coloreada* = $(P, T, \{TxP\}, \{PxT\}, Mo, W, C)$

Donde: $(P, T, \{TxP\}, \{PxT\}, Mo, W)$ se definen como antes y $C =$ es el conjunto finito de clases de colores para los tokens

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 trabajo ni máquina ocupada, ni el concepto de arcos inhibitorios.

2.4.9. Redes de Petri Temporizadas

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 determinen las demoras.

Matemáticamente una Red de Petri con Tiempo puede definirse a partir de la siguiente tupla: *Red de Petri con Tiempo* = $(P, T, \{TxP\}, \{PxT\}, Mo, W, \Theta)$

Donde: $(P, T, \{TxP\}, \{PxT\}, Mo, W)$ se definen como antes y $\Theta =$ es el conjunto de retardos asociados con las transiciones.

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.

Este proceso concluye con 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.

CAPÍTULO 3

DEFINICIÓN DE LA SOLUCIÓN

3.1. Problema

En este capítulo se detalla los problemas de la Simulación de Sistemas de Eventos Discretos centrados en los Sistemas Flexibles de Manufactura basados en Redes de Petri como solución, se debe considerar que el diseño y planificación de FMS contemplan muchos componentes (máquinas, robots, entradas, salidas), fabricando secuencias en escenarios complejos por lo cual obtener una herramienta de simulación gráfica que considere las tomas de decisiones para realizar todas las operaciones de forma correcta con una interfaz amigable para el usuario sería necesaria.

La razón principal para investigar este tema es encontrar una herramienta de simulación gráfica dirigida al usuario final con el objetivo de reducir lo máximo la dificultad del uso de la misma para poder crear cualquier tipo de FMS, por lo cual se consideran los siguientes problemas a afrontar en la creación del Simulador Grafico:

- Desarrollo de una interfaz que considere todos los requisitos para poder diseñar una FMS.
- Ser capaz de encontrar la mejor solución basada en Redes de Petri.
- Obtener datos de la simulación para procesarlos.

Basado en los puntos anteriores se considera la necesidad de métodos para afrontar los problemas para lo cual se toma en cuenta las siguientes restricciones:

- Todos los trabajos están procesados en el mismo FMS.
- Todos los materiales están a punto para procesar.
- Cada Máquina puede manejar una operación para un trabajo a la vez.
- Una vez iniciada la operación en una máquina no pueda ser detenida.
- Se respeta la secuencia de fabricación para cada trabajo.

- Si dos o más trabajos necesitan ser transportados al mismo tiempo se debe dar paso a la secuencia que se encuentre más cerca de finalizar su proceso.
- Se verifica si el manipulador desplazó el producto hasta la máquina para que ésta inicie su proceso
- Una forma de crear un programa factible es la consideración de usar buffer individuales o compartidos para almacenar los datos de manera temporal y mantener la secuencia de cada uno de los productos.

3.2. Limitaciones

Para definir la solución de los problemas de FMS existen tres amplias categorías para el diseño de la planificación en sistemas de fabricación como: Investigación de Operaciones, Inteligencia Artificial y Simulación. (Chryssolouris, 2006)

3.2.1. Investigación de Operaciones

La investigación de operaciones está basada en la programación matemática y sirve para maximizar o minimizar una función algebraica con el objetivo de encontrar la solución óptima.

3.2.1.1 Programación Lineal

Una programación matemática es llamada programación lineal si la función objetivo $f(x_1, x_2 \dots x_n)$ y cada función de restricción $g_i(x_1, x_2 \dots x_n)$ son lineales en sus argumentos.

Hay una serie de supuestos, que se hacen en la formulación y la solución de un problema de programación lineal como:

- **Proporcionalidad:** La contribución de cada variable para la función objetivo es proporcional al valor de la variable de decisión.
- **Aditividad:** La contribución de cada variable de decisión a la función objetivo y a cada restricción, es independiente de los valores de las otras variables de decisión.
- **Divisibilidad:** Las variables de decisión pueden acceder a cualquier valor real.

- **Certeza:** Todos los coeficientes de *la función objetivo a minimizar o maximizar* y las variables de las restricciones se conocen con certeza.

3.2.1.2. Programación Entera

Para el caso de la Programación Entera la función objetivo se define por la ecuación $c_1x_1 + c_2x_2 \dots + c_nx_n$ la cual sintetiza los objetivos de optimización del sistema, las funciones de restricción vienen dadas por $a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ijn}x_n \leq \text{ó} \geq b_i$, y estas representan los límites (constrains).

Un programa de número entero es lineal con la limitante adicional de que las variables de decisión $x_1, x_2 \dots x_n$ de la función objetivo, deben ser números enteros. Muy a menudo, los coeficientes c_i de la función objetivo y los coeficientes a_{ij} y la constante b_i de la función de restricción también se ven limitados a ser integral.

3.2.1.3. Solución de Programación Entera

Se puede resolver una programa entero por medio de una programación lineal haciendo caso omiso de la limitante de número entero para la función objetivo y la función de restricción, este tipo de solución se la conoce como la primera aproximación a la solución de un programa entero considerada como una solución óptima del programa entero inicial

Existe una segunda aproximación que se obtiene redondeando los componentes de la primera aproximación al número entero más cercano posible. Esta aproximación es más satisfactoria cuando la primera aproximación contiene grandes números, mientras que puede ser inexacto cuando los números son pequeños.

3.2.1.4. Programación Dinámica

La programación dinámica es un método para la resolución de problemas que pueden ser vistos como procesos de toma de varias etapas. Un proceso de toma de múltiples etapas es un proceso que se puede separar en una serie de pasos secuenciales, o etapas, el cual puede ser completado en una o más formas. Las opciones para completar las etapas se llaman decisiones. Una política es una secuencia de decisiones, uno para cada etapa del proceso.

La condición del proceso en una etapa dada efectúa una transición de la corriente estado a un estado asociado a la siguiente etapa. Muchos procesos de varias etapas de decisión tienen retornos (costos o beneficios) asociados a cada decisión, y estos retornos pueden variar con cada etapa y estado del proceso. El objetivo en el análisis de estos procesos es determinar una óptima política, una que da como resultado la mejor rentabilidad total.

3.2.2. Inteligencia Artificial

El campo de la inteligencia artificial se puede definir como la ciencia de la computación que comprende el estudio y la creación de sistemas computarizados que manifiestan cierta forma de inteligencia como sistemas que aprenden nuevos conceptos y tareas, sistemas que pueden razonar y derivar conclusiones útiles acerca del mundo que nos rodea y sistemas que realizan otro tipo de actividades que requieran de inteligencia humana. Se han desarrollado muchas aplicaciones que utilizan algunos de los métodos o algoritmos diseñados por inteligencia artificial orientados a sistemas de fabricación. (Chryssolouris, 2006)

3.2.3. Solución por Simulación

La simulación por computadora es el nombre genérico para una clase de software de computación que simula el funcionamiento de un sistema de fabricación. Conceptualmente las entradas de un simulador de computadora son variables de decisión que especifica el diseño de un sistema de fabricación.

El simulador ingresa los datos en un modelo de sistema de fabricación incluyendo las normas en cuanto a los componentes del sistema que interactúan entre sí. El usuario del simulador especifica el estado inicial para el modelo de los sistemas de fabricación, a partir del estado inicial el simulador sigue el funcionamiento del modelo en el tiempo, además sigue los eventos y operaciones de los procesos. La simulación proporciona como salida un conjunto de medidas estadísticas

3.3. Simulación con Redes de Petri

La solución del modelo de Red de Petri a usarse en el Simulador Gráfico contempla los elementos que integran una FMS es decir máquinas y manipuladores, además de la creación de un buffer que ayude a la toma de decisiones.

3.3.1. Redes de Petri para Máquina y Robot (Manipulador)

En la Figura 4 se puede apreciar que la representación de una Red de Petri para una máquina es prácticamente idéntica al de un robot con diferentes nombres de variables para los lugares y las transiciones, considerando que cada lugar tiene un solo sitio que representa la capacidad de realizar un solo trabajo en cualquier tiempo, los lugares In y Out representan buffers incluidos en cada máquina o robot representando entradas o salidas de máquinas o robots, las transiciones tienen un rol importante en la simulación ya que nos permite crear los retrasos de tiempo para simular los procesos de fabricación, con ayuda de la información contenida en los tokens de transiciones se puede programar comportamientos especiales.

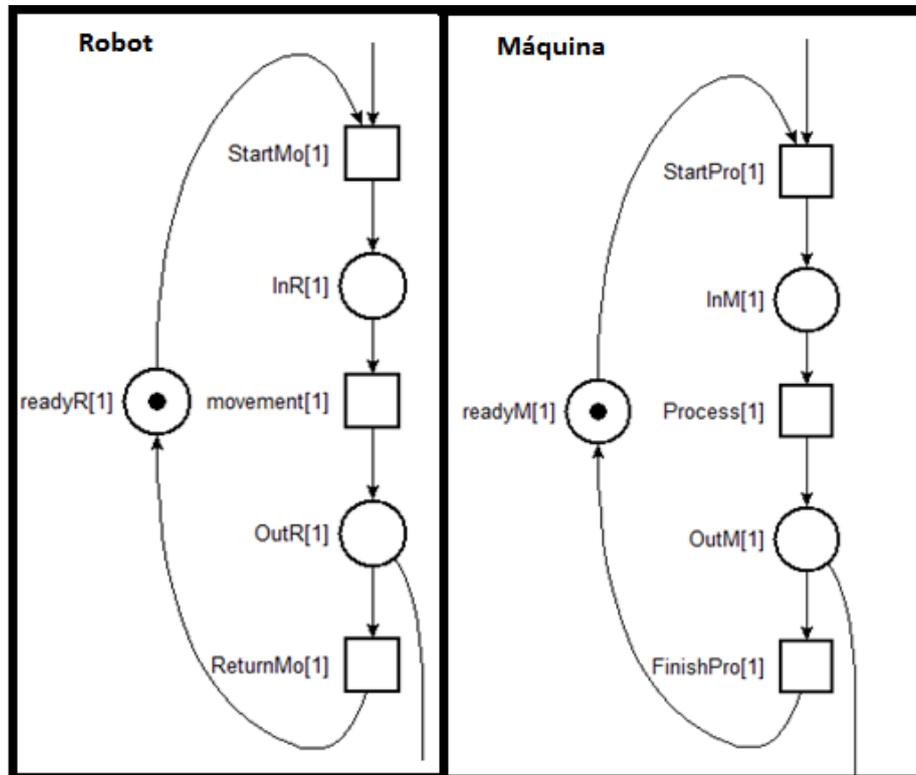


Figura 4. Redes de Petri para Máquina y Robot

También se puede apreciar en la Figura 4 que las transiciones StarMo para los robots simulan el movimiento o transporte y StarPro simula el proceso disparando la siguiente transición hacia los lugar OutM y OutR los que representan cuando una máquina o un robot terminaron sus secuencias y están listos para el siguiente trabajo, es por esa razón que la Red de Petri cuenta con dos conexiones, la primera readyR o readyM y la segunda la que es activada por un proceso previo.

3.3.2. Red de Petri para Buffer

Además de las Redes para Máquina y Robot se consideró que cada máquina y robot puede tener un buffer separado o dependiendo del diseño puede tener un buffer compartido por lo cual se creó un buffer de memoria intermedia.

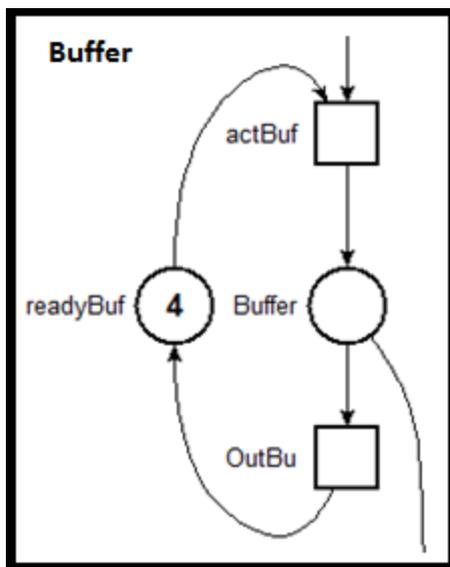


Figura 5. Red de Petri para Buffer

En la Figura 5 se observa el diseño de una Red de Petri para un Buffer el cual sigue la lógica de diseño de la máquina y robot, con la excepción de que en el lugar readyBuf el cual representa la capacidad puede almacenar varios tokens a la vez para ser disparados dependiendo de las diferentes transiciones que se encuentren conectadas al buffer, y que no cuenta con una transición de transporte o proceso.

3.3.3. Red de Petri para Simulador

Con las Redes de Petri de máquina, robot y buffer se crea una representación unificada para obtener una RdP para el Simulador como se observa en la Figura 6 capaz de evaluar y simular cualquier sistema de fabricación tomando algunas consideraciones:

- La información contenida en los tokens puede ser modificada por cualquier transición o lugar.
- Los lugares de salidas de máquinas, robots y buffers se conectan a otros componentes del sistema, teniendo sincronización el caso de disparar dos o más transiciones al mismo tiempo.

- La activación de transporte para transición StarMo depende de un conjunto de reglas para decidir la continuación del proceso de cada producto, para el caso de tener varios procesos de transporte activos al mismo tiempo se hace uso del buffer que administra la activación dependiendo de la secuencia de los productos.
- El diseño de Red de Petri para el Simulador crecerá dependiendo del número de máquinas y robots existentes en el diseño conectados entre sí.

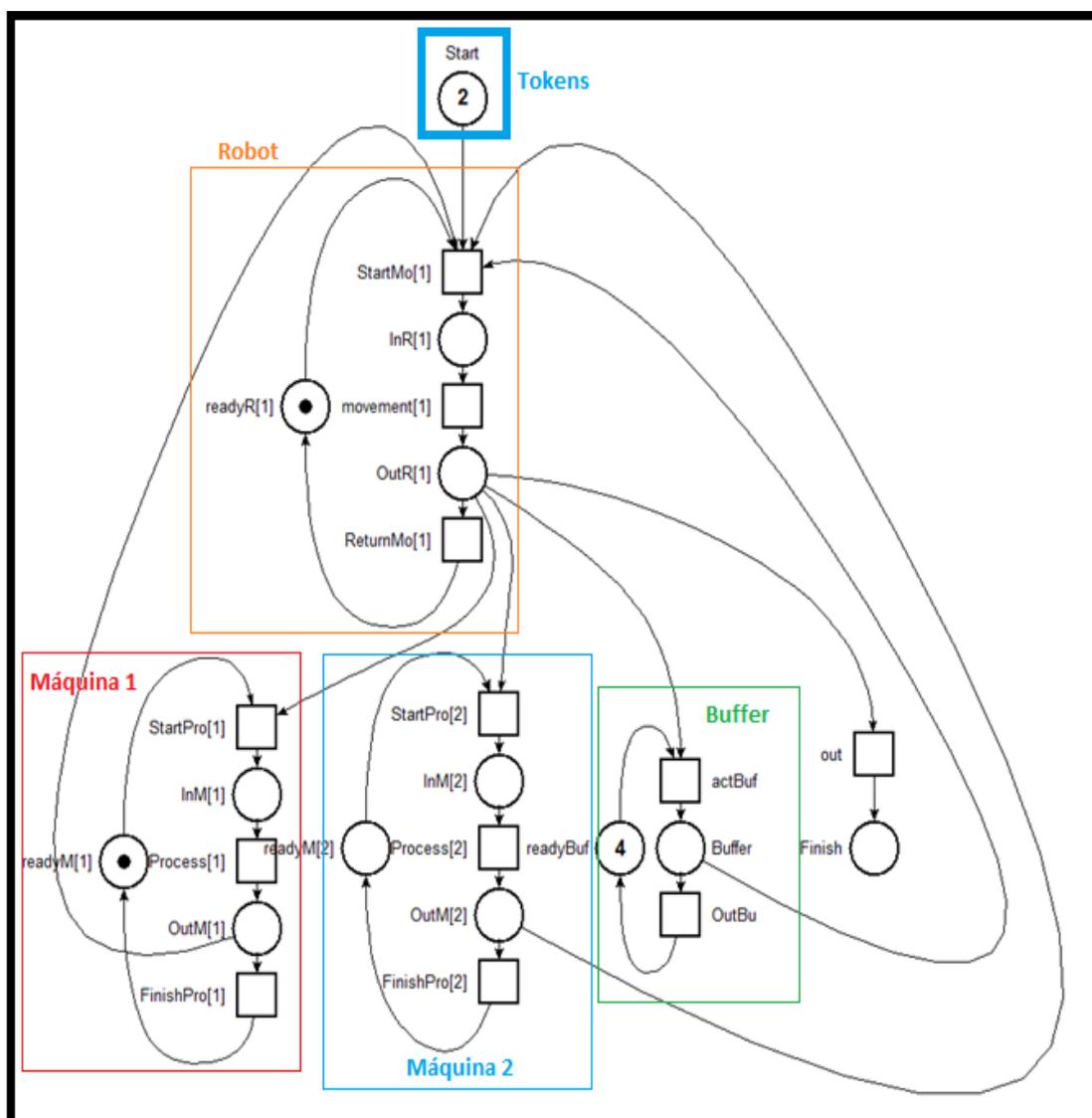


Figura 6. Red de Petri para Simulador

3.4. Interfaz Gráfica

Se debe considerar los requerimientos mínimos de hardware y software para la instalación del programa:

Software: funciona en sistemas operativos compatibles con máquina virtual Java en sus diferentes versiones de Windows XP, 7, 8 y 10.

Hardware: para este caso considera como configuraciones mínimas

- Procesador: Intel Pentium III o equivalente a 800 MHz
- Memoria Ram: 1 GB
- Espacio en disco: 10 MB de espacio libre en el disco

Para el desarrollo del presente proyecto, en la etapa de diseño se tomó en cuenta los requisitos que contempla cada objeto en este caso el de máquinas, manipuladores, salidas y entradas.

En la Figura 7 se observa el inicio del programa una vez ejecutado carga una pequeña pantalla con el logo de la institución y una barra que indica el estado de carga.



Figura 7. Pantalla de Carga

Después de pasar la pantalla de carga aparece una pantalla con un menú, el cual se accede para crear un nuevo proyecto como indica la Figura 8.

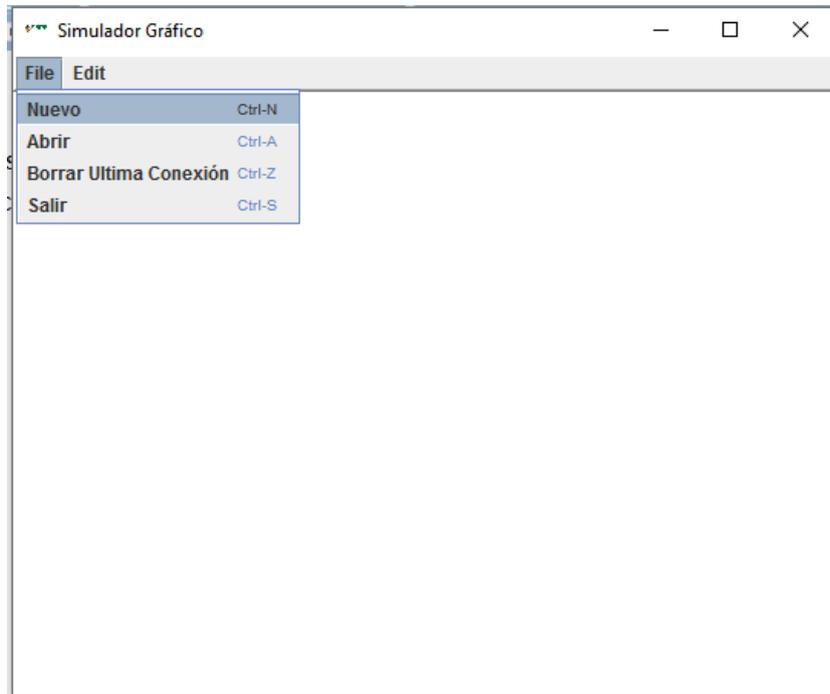


Figura 8. Menú

Una vez creado un nuevo proyecto se despliega una pantalla en la cual se puede crear el diseño de un FMS con ayuda de los diferentes botones que se encuentran en la interfaz como se observa en la Figura 9, la cual esta diferenciada por un bloque de Ingreso de Elementos, un bloque de Visualización de datos, el bloque con diferentes Listas, el Espacio o Área de Trabajo y un bloque para el Control de la Simulación.

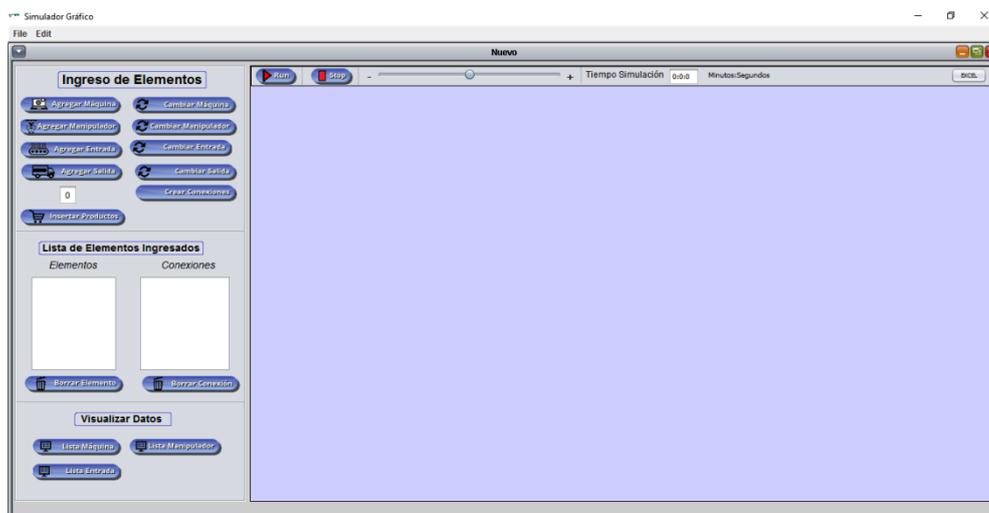


Figura 9. Interfaz Gráfica

3.4.1. Bloque de Ingreso de Elementos

En el bloque de Ingreso de Elementos se puede realizar el ingreso de Máquinas, Manipuladores, Entradas y Salidas, los cuales se despliegan con formas específicas en el área de trabajo y se las puedes desplegar conforme al diseño de la FMS, cada elemento cuenta con su nombre específico y numerado como se puede observar en la Figura 10.

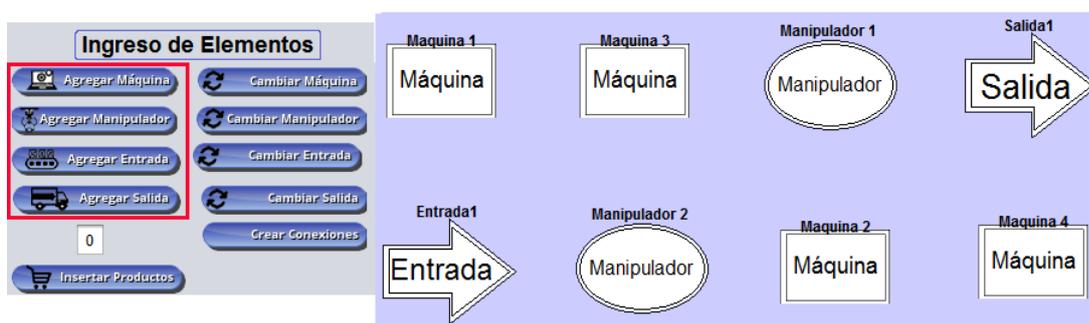


Figura 10. Bloque de Ingreso de Elementos

En el mismo bloque de Ingreso de Elementos también se encuentra botones con los cuales se puede cambiar el color de cada uno de los elementos para que exista una mejor diferenciación y un diseño más llamativo para el usuario esto se puede observar en la Figura 11.

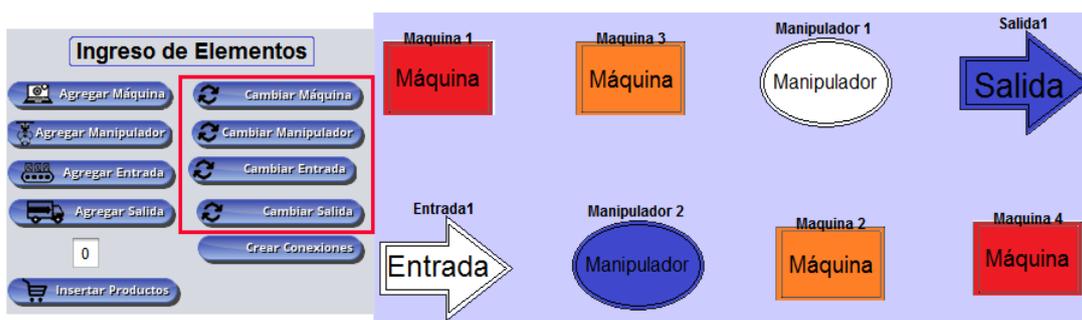


Figura 11. Modificación de Elementos

Para la creación de conexiones entre los diferentes elementos del modelo se define los siguientes conceptos para facilitar la comprensión del programa:

- Elemento de Entrada: se considera al elemento graficado dentro del área de trabajo con forma de flecha hacia la izquierda identificado por la palabra “Entrada”.

- Elemento de Salida: Se considera al elemento graficado dentro del área de trabajo con forma de flecha hacia la izquierda identificado por la palabra “Salida”.
- Registro de Entrada: se define como la entrada de una conexión entre dos elementos
- Registro de Salida: se define como la salida de la conexión de un elemento hacia la entrada de otro.

En la Figura 12 se observa que una vez ingresados los elementos necesarios para el diseño de un FMS se los conecta con el botón Conexiones que se encuentra en el bloque de Ingreso de Elementos dependiendo del diseño elegido con algunas restricciones que el programa contiene como:

- El elemento Entrada no puede ser conectado como Registro de Entrada.
- El elemento Salida no puede ser conectado como Registro de Salida.
- No se puede crear dos veces la misma conexión.

Además cada conexión se diferencia por dos colores evitando la confusión entre las líneas, además en cada extremo se dibuja un cuadrado que representa registro de salida y un círculo en el registro de entrada.

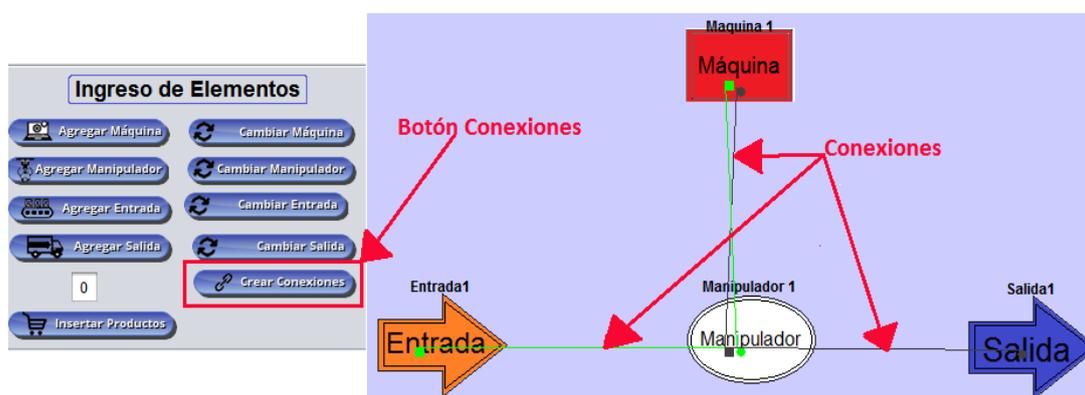


Figura 12. Conexiones

El número de tipos de producto se los puede realizar también en el bloque de Ingreso de Elementos con ayuda del botón Insertar Productos considerando que el tipo de número debe ser tipo entero como se ve en la Figura 13.



Figura 13. Bloque Lista Elemento

3.4.2. Bloque de Listas de Elementos

Los elementos y conexiones ingresados en el área de trabajo también se los puedes observar en la Listas desplegable de Elementos y Conexiones, en el orden en el que fueron creados, esta lista nos ayuda para eliminar o modificar los elementos en el área de trabajo con ayuda de los diferentes botones que se encuentran en la interfaz como se visualiza en la Figura 14.

Las Listas de Conexiones se crean a partir de un código formado por la primera letra del elemento y su número respectivo dependiendo del tipo de elemento.



Figura 14. Bloque Lista Elemento

3.4.3. Bloque Área de Trabajo

En el Área de Trabajo una vez dispuesto el diseño del FMS se puede configurar cada uno de los elementos dando doble clic en el respectivo elemento el cual abrirá una nueva ventana con las propiedades a modificarse el cual guardará la información en las bases de datos.

Como se puede observa en la Figura 15 se contempla las propiedades del puesto de trabajo el cual esta compuesto por el nombre de la respectiva máquina a la que se ingreso, el tipo de producto que se desea modificar, la cantidad de piezas a procesarse y el tiempo de proceso.

Figura 15. Propiedades Máquina

En la Figura 16 se puede mirar las Propiedades de Manipulador en el cual solo se configura el tiempo de transporte de cada una de las conexiones realizadas previamente y por defecto las salidas-entradas de las conexiones en forma de código con las casillas desactivadas para la modificación.

PROPIEDADES MANIPULADOR		
SALIDA	ENTRADA	TIEMPO (Min)
E1	R1	2
R1	M1	1
M1	R1	2
R1	S1	1

Figura 16. Propiedades Manipulador

En las propiedades de entrada se configura en una primera ventana (Figura 17) el número de operaciones máximo necesario para el diseño de FMS basado en el número de conexiones existentes.

La secuencia de un producto se define como el uso ordenado de las conexiones necesarias que debe realizar el sistema para fabricar un tipo de producto.

Número de Operaciones Máximo está definido por la secuencia más grande de los diferentes tipos de productos existentes.

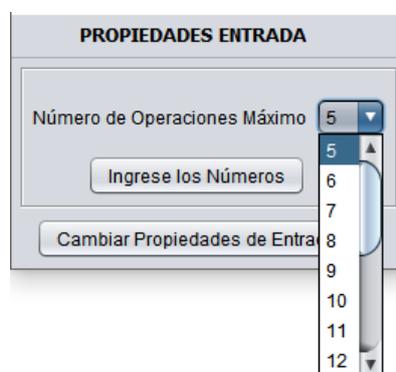


Figura 17. Propiedades de Entrada

Una vez configurado este número se abre una ventana nueva donde se inserta los datos del total de productos de cada tipo y se crea las secuencias de operaciones para cada producto basado en las conexiones realizadas previamente (Figura 18).

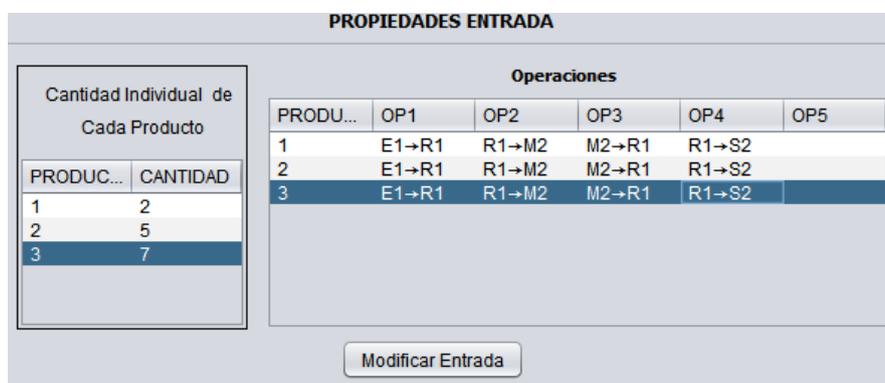


Figura 18. Modificación Propiedades Entrada

3.4.4. Bloque Visualización de Datos

Se puede realizar la visualización de datos de las listas de Máquina, Manipulador y Entrada con se ve en la Figura 19, en cada una de estas listas se observa los datos guardados de los requisitos que cada uno de estos elementos necesitan para configurar el FMS.



Figura 19. Bloque Visualización de Datos

Al ingresar en las Listas de Máquina se despliega una ventana con los datos respectivos de código de máquina, número de producto, capacidad de la máquina y tiempo de proceso, en esta ventana se puede modificar y eliminar los campos si es necesario (Figura 20).

CODIGO	PRODUCTO	CAPACIDAD	TIEMPO (Min)
Maquina 2	2	1	3
Maquina 2	2	1	1
Maquina 2	1	1	1

Modificar Campos Eliminar Campo

Figura 20. Lista Máquina

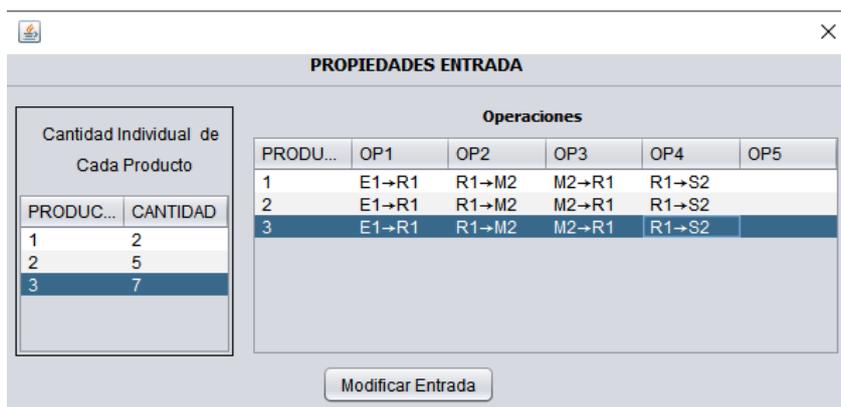
En las Listas Manipulador se puede observar directamente los datos guardados de las conexiones existentes y poder modificar los campos de tiempo de transporte como se observa en la Figura 21.



SALIDA	ENTRADA	TIEMPO (Min)
R1	S2	1
M2	R1	2
R1	M2	1
E1	R1	2

Figura 21. Lista Manipulador

En la Figura 22 se puede observar las Listas Entrada con la opción de poder modificar directamente las Propiedades de Entrada



PRODU...	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5
1	E1→R1	R1→M2	M2→R1	R1→S2	
2	E1→R1	R1→M2	M2→R1	R1→S2	
3	E1→R1	R1→M2	M2→R1	R1→S2	

Figura 22. Lista Entrada

3.4.4. Bloque de Simulación

Este último bloque contiene los botones para iniciar, detener la simulación, control de velocidad de la misma, el tiempo total de la simulación realizada y un botón para exportar los datos obtenidos al simular el FMS en un archivo de Excel en formato (.xls) (Figura 23).



Figura 23. Bloque de Simulación

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN

4.1. Descripción del Software

El Simulador Gráfico basado en Redes de Petri fue diseñado en lenguaje de programación libre Java con el objetivo de reducir el nivel de complejidad de moldeamiento de los sistemas de manufactura flexibles sin la necesidad que el usuario final requiera de conocimientos avanzados y sea amigable en su funcionamiento.

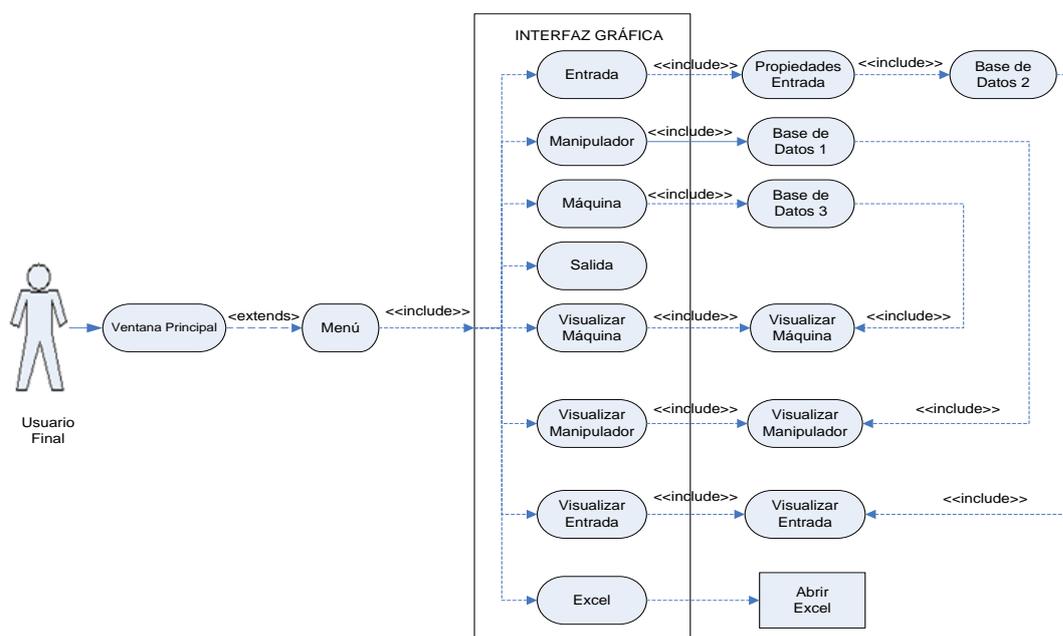


Figura 24. Diagrama de Caso de Uso Simulador Gráfico

En la Figura 24 se observa la descripción de los pasos o actividades que el Usuario Final debe llevar a cabo para generar una simulación de un modelo FMS en el Simulador Gráfico, según el Diagrama de Caso de Uso se realizó una distribución de 18 clases con 10 interfaces relacionadas entre sí, donde el usuario va a poder manipular la aplicación de forma sencilla,

estos archivos constan de las clases y métodos adicionales necesarios para manejar funcionalidades comunes, además se buscó aplicar la mejor forma para la reutilización de código, diseñando métodos que permitan tener centralizadas ciertas funciones para el mejor uso del sistema.

4.1.1. Hilos o Threads

En el desarrollo del software para el Simulador Gráfico se debe considerar el estudio de Hilos o Thread, ya que se conecta directamente con el lenguaje Java y se aplicó como herramienta para constitución y creación de las Redes de Petri , para lo que se debe considerar algunos aspectos importantes como:

Un hilo es un proceso en un programa ejecutándose dentro de su propio espacio de dirección, Java es sistema multiproceso, esto significa que soporta varios procesos corriendo a la vez dentro de sus propios espacios de direcciones, un hilo es una secuencia de códigos en ejecución dentro del contexto de un proceso, los hilos no pueden ejecutarse solos, requieren de la supervisión de un proceso padre para correr, los hilos a menudo son conocidos o llamados procesos ligeros muy similar a un proceso con la diferencia de que un hilo siempre corre dentro del contexto de otro programa. Los procesos mantienen su propio espacio de direcciones y entorno de operaciones, los hilos dependen de un programa padre en lo que se refiere a recursos de ejecución. (Inmaculada, 2002).

En la Figura 25 se observa un ejemplo de cómo una aplicación ejecuta varios procesos simultáneamente y dentro de este proceso a la par hilos que actúan paralelamente e independientemente cumpliendo sus funciones y métodos en un plano secundario del código del programa.

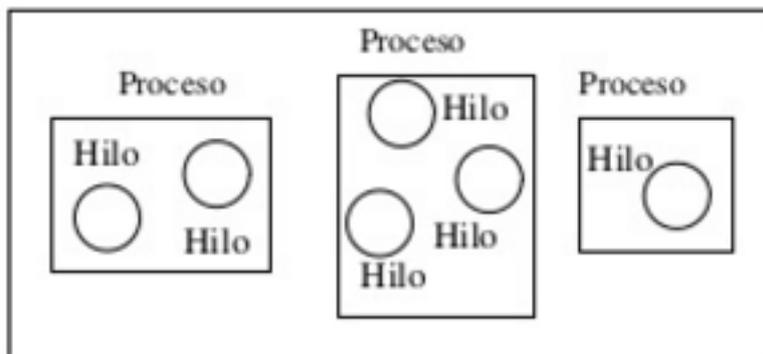


Figura 25. Relación entre Hilos y Procesos

4.1.2. Clases Relacionadas con Hilos

El lenguaje de programación Java proporciona soporte para hilos de una simple interfaz y un conjunto de clases, Java incluye funcionalidades sobre hilos como las siguientes:

- Thread
- Runnable

Thread (Inmaculada, 2002): Esta clase es responsable de producir hilos funcionales para otras clases. Para añadir la funcionalidad de hilo a una clase simplemente se deriva la clase de Thread y se ignora el método run. Es en este método run donde el procesamiento de un hilo toma lugar y a menudo se refieren a él como el cuerpo del hilo. La clase Thread también define los métodos start y stop, los cuales te permiten comenzar y parar la ejecución del hilo.

Runnable: Java no soporta herencia múltiple de forma directa, es decir, no se puede derivar una clase de varias clases padre. Esto nos plantea la duda sobre cómo podemos añadir la funcionalidad de Hilo a una clase que deriva de otra clase, siendo distinta de Thread. Para lograr esto se utiliza la interfaz Runnable. La interfaz Runnable proporciona la capacidad de añadir la funcionalidad de un hilo a un clase simplemente implementando la interfaz en lugar de derivándola de la clase Thread.

4.1.2. Creación de Hilos

En java los hilos comparten el mismo espacio de memoria. Incluso comparte gran parte del entorno de ejecución, de modo que la creación de nuevos hilos es mucho más rápida que la creación de nuevos procesos. La ventaja que proporcionan los hilos es la capacidad de tener más de un camino de ejecución en un mismo programa. Así, con un único proceso, ejecutándose JVM (Java Virtual Machine), habrá siempre más de un hilo, cada uno con su propio camino de ejecución.

Estado Y Control De Hilos

El comportamiento de un hilo depende del estado en que se encuentre, este estado define su modo de operación actual, si está corriendo o no. (Inmaculada, 2002)

Relaciones de estado en los que puede estar un hilo Java.

- ✓ New
- ✓ Runnable

New: Un hilo esta en el estado New la primera vez que se crea y hasta que el método start es llamado. Los hilos en estado New ya han sido inicializados y están listo para empezar a trabajar pero aun no han sido notificados para que empiecen a realizar su trabajo.

Runnable: Cuando se llama al método start de un hilo nuevo, el método run es invocado y el hilo entra en el estado runnable. Este estado podría llamarse “running” porque la ejecución del método run significa que el hilo está corriendo. Aunque cada hilo está corriendo desde el punto de vista del usuario, en realidad todos los hilos, excepto el que en estos momentos está utilizando la CPU, están en el estado runnable (ejecutables, listos para correr) en cualquier momento dado. Uno puede pensar conceptualmente en el estado runnable como si fuera el estado “running”, solo tenemos que recordar que todos los hilos tienen que compartir los recursos del sistema.

Not running: el estado not running se aplica a todos los hilos que están parados por alguna razón. Cuando un hilo está en este estado, está listo para ser usado y es capaz de volver al estado runnable en un momento dado. Los hilos pueden pasar al estado not running a través de varias vías.

A continuación se citan diferentes eventos que pueden hacer que un hilo este parado de modo temporal.

- El método suspend ha sido llamado
- El método sleep ha sido llamado
- El método wait ha sido llamado
- El hilo está bloqueado por I/O

Para cada una de estas acciones que implican que el hilo pase al estado not running hay una forma para hacer que el hilo vuelva a correr. A continuación se presenta la lista de eventos correspondientes que pueden hacer que el hilo pase al estado runnable:

- Si un hilo está durmiendo pasará el número de milisegundo que se ha especificado que debe dormir. (Sleep)
- Si un hilo está esperando, la llamada a notify o notifyAll por parte del objeto por el que espera (Synchronized).
- Si un hilo está bloqueado por I/O, la finalización de la operación I/O en cuestión.

4.2. Diagrama de Flujo

En el Diagrama de Flujo de la Figura 26, se describe el funcionamiento interno del Simulador Gráfico basado en Redes de Petri e Hilos de Java, en el cual que con ayuda de la interfaz gráfica se puede ingresar los datos en las diferentes bases de datos considerando que antes de iniciar la simulación el programa verifica si estos datos fueron ingresados correctamente como se observa en el diagrama, una vez verificados los datos el programa calcula la suma total de los productos de cada lote y crea hilos con el nombre (Nuevo Hilo) más

un ID que va desde el primer producto hasta n o el último producto ($i\dots n$), estos hilos contienen en su interior tokens o información de cada producto que para cada uno sería:

- Número de Lote
- Número de Producto
- Secuencia del Lote
- Tiempos de Producto para cada Máquina y Robot

Se debe considerar que cada uno de estos hilos creados se quedan en estado Not Running por medio del método WAIT a espera de que alguna condición del programa los active para iniciar su proceso, como se observa en el diagrama el primer hilo en activarse es el hilo del Producto i que para el caso es el número 1, este siguiendo el proceso del diagrama pasa a iniciar su secuencia y se mantiene realizando los respectivos procesos mientras las secuencias no lleguen a su fin.

Cada una de estas secuencias tienen el propósito de activar el transporte del robot y verificar si existe o no producto a procesarse como se observa en el diagrama, se debe acotar que los buffers del diagrama son la representación del Buffer para las Redes de Petri así como también las de Máquina y Robot, siguiendo con el flujo del diagrama si la máquina se encuentra ocupada nos informa que el robot está listo para seguir procesando por lo cual da una señal para activar un Hilo Nuevo con siguiente Producto $i+1$, así sucesivamente hasta llegar al Producto n , y si la máquina termina su proceso activa otra señal para que el producto asignado siga con su secuencia.

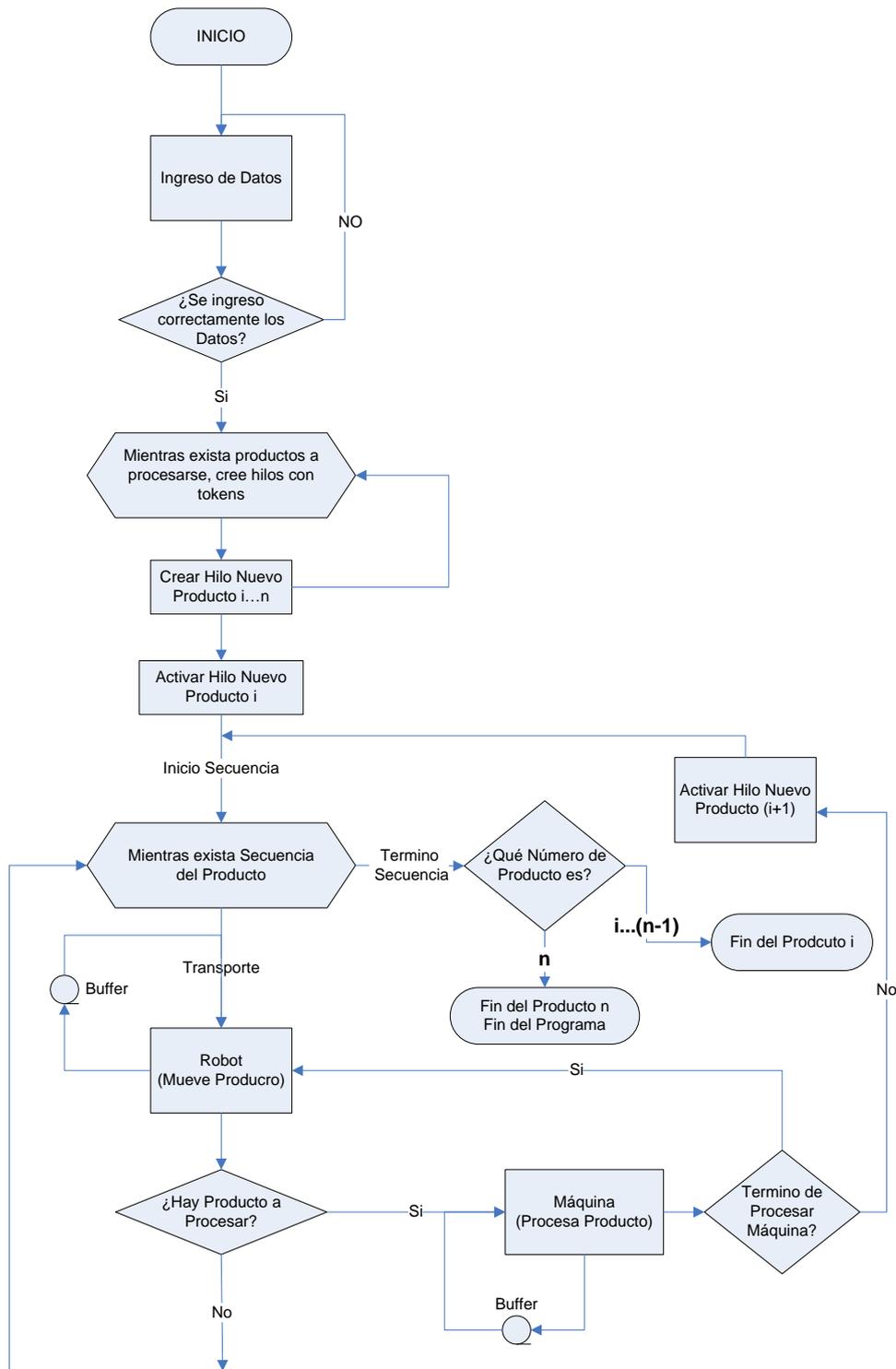


Figura 26. Diagrama de Flujo para Simulador Gráfico

Una vez terminada la secuencia de cada producto el programa compara el ID del producto que finalizó para determinar si es el fin para un producto terminado ($i \dots n-1$) o el fin del último producto (n) el cual finaliza la simulación.

4.3. Modelado de un FMS

En el presente capítulo se aplican los conceptos de las teorías planteadas en un modelo generado por el Simulador Gráfico en un FMS con recursos compartidos

Se implementó un modelo en el Simulador Gráfico para un FMS, que está conformado por dos Máquinas, un Robot, una Entrada y una Salida como se puede observar el siguiente diagrama de bloques en la Figura 27.

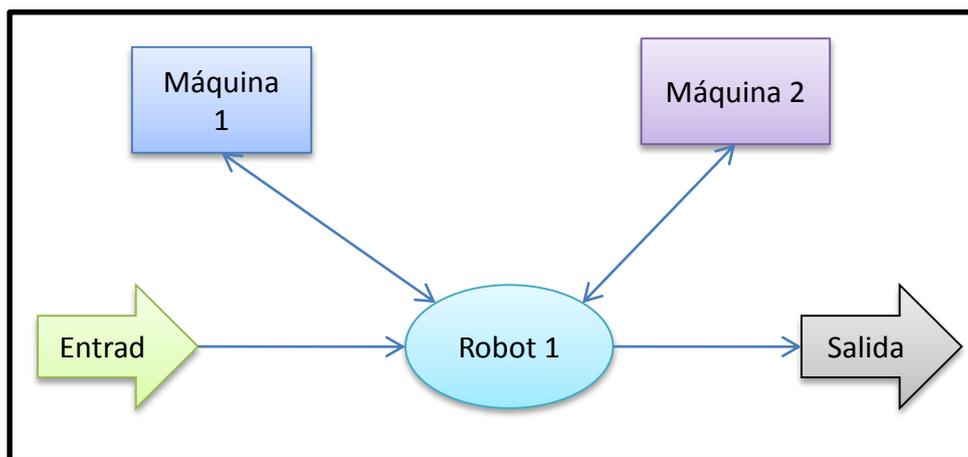


Figura 27. Diagrama de Bloques de Modelo

Con el presente diseño se dispone a ejecutar el programa y llenar cada uno de los requisitos de los elementos planteado en el diagrama de bloques se puede observar en la Figura 28 como se inserta cada uno de los elementos mencionados del modelo dentro del área de trabajo del Simulador Gráfico con ayuda del bloque de Ingreso de Elementos.

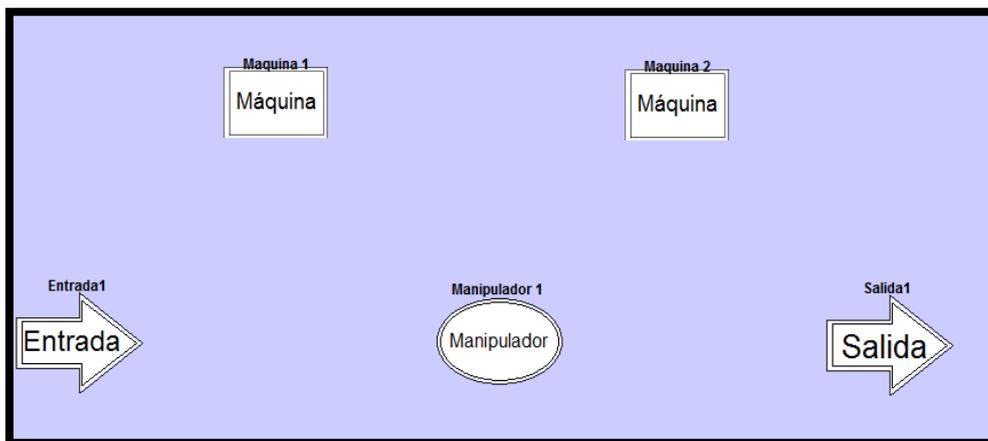


Figura 28. Ingreso de Elementos para Modelado

Una vez ingresados los elementos se procede a realizar las conexiones necesarias entre los mismos obteniendo el diagrama de la Figura 29.

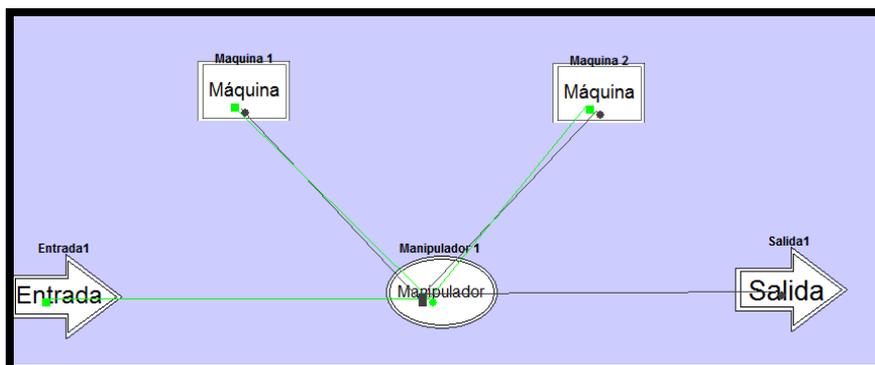


Figura 29. Conexiones para el Modelo

Con las conexiones realizadas se debe ingresar el número de tipos de productos a fabricarse como se observa en la Figura 30, para nuestro caso serán 2.



Figura 30. Ingreso de número de productos

Con el modelo, las conexiones y el número de productos a fabricarse se procede a llenar cada uno de los campos de los diferentes elementos ingresados, en nuestro caso cada máquina

cuenta con una casilla con el número de tipos de productos ingresados previamente, por lo cual se debe realizar el ingreso individual de las propiedades de cada máquina (Máquina 1 y Máquina 2) según el tipo de producto, llenando los campos de capacidad y tiempo de proceso como se muestra en la Figura 31.

Figura 31. Configuración de Máquinas

Después de configurar los requisitos de máquina, se los puede visualizar en una tabla mediante el bloque de Visualizar Datos, en el cual no solo se puede observar los datos guardados sino, también modificar o eliminar un registro ingresado incorrectamente como se observa en la Figura 32.

CODIGO	PRODUCTO	CAPACIDAD	TIEMPO (Min)
Maquina 2	2	1	2
Maquina 2	1	1	1
Maquina 1	2	1	3
Maquina 1	1	1	2

Figura 32. Visualizar Datos Máquina

El siguiente elemento a configurarse es el Manipulador el cual ya tiene un registro creado a partir de las Entradas y Salidas de las Conexiones realizadas previamente por lo cual la configuración del Manipular es la de los tiempos de transporte entre los elementos como se

muestra en la Figura 33, se debe considerar que a esta tabla se puede ingresar directamente desde el bloque de Visualizar Datos con ayuda del botón Lista Manipulador.



SALIDA	ENTRADA	TIEMPO (Min)
R1	S1	1
M2	R1	2
R1	M2	2
M1	R1	1
R1	M1	2
E1	R1	1

Figura 33. Configuración Manipulador

El último elemento a configurarse es la Entrada donde primero se elige el número de secuencias que el modelo tiene en función de las conexiones realizadas como se observa en la figura 34, para nuestro caso el Número de Operación es 6.



Figura 34. Propiedades Entrada

Al elegir el Número de Operaciones necesario para el modelo se abre una ventana en la cual se ingresará la cantidad de producto a fabricarse de cada uno de los tipos de producto ingresado previamente, además se debe completar las secuencias con datos de las conexiones realizadas en el modelo para cada uno de los tipos de productos mencionados anteriormente.

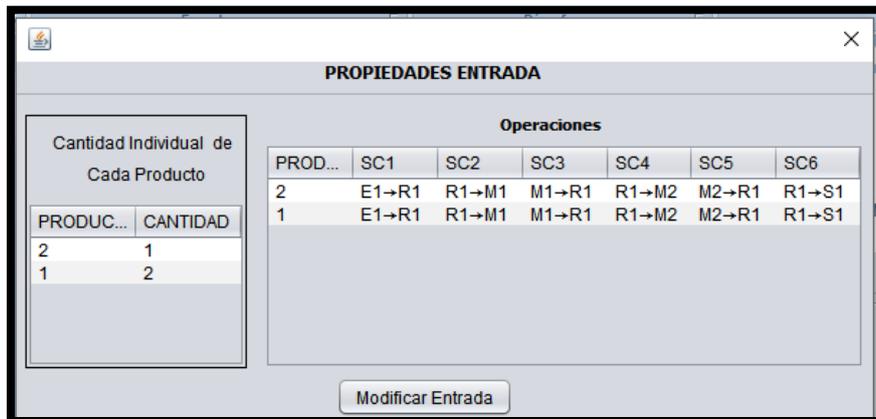


Figura 35. Configuración Entrada

Cuando todas las configuraciones se han realizado correctamente se puede iniciar la simulación con ayuda del bloque de Simulación con el botón Run, cabe señalar que este botón antes de inicializar la simulación nos informa sobre los estados de las configuraciones de los elementos alertándonos si falta llenar campos o iniciando la simulación sin novedades.

Una vez iniciada la simulación se puede variar la velocidad de la misma, además se observa el transcurso de los procesos gráficamente con el avance de transporte entre cada elemento (Figura 36) y el procesos de máquina (Figura 37), se considera el uso de colores en el proceso gráfico para diferenciar los tipos de productos esto se puede observar en la Figura 38.

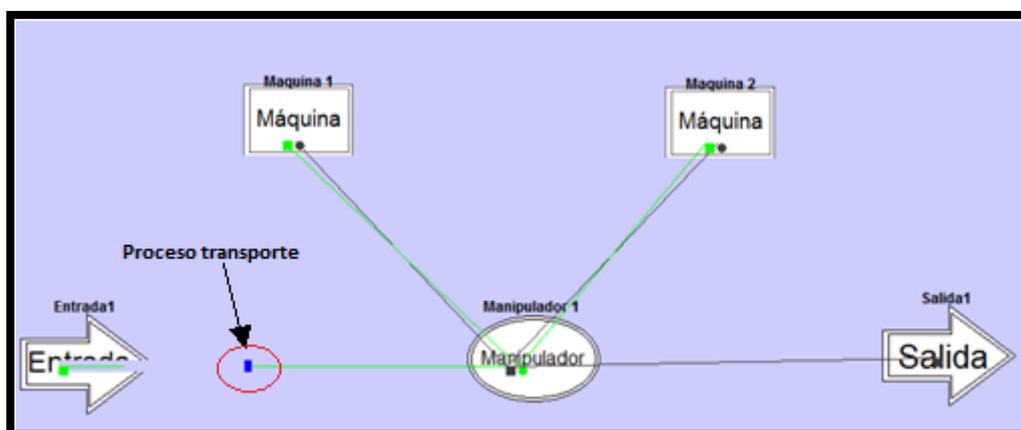


Figura 36. Proceso Transporte

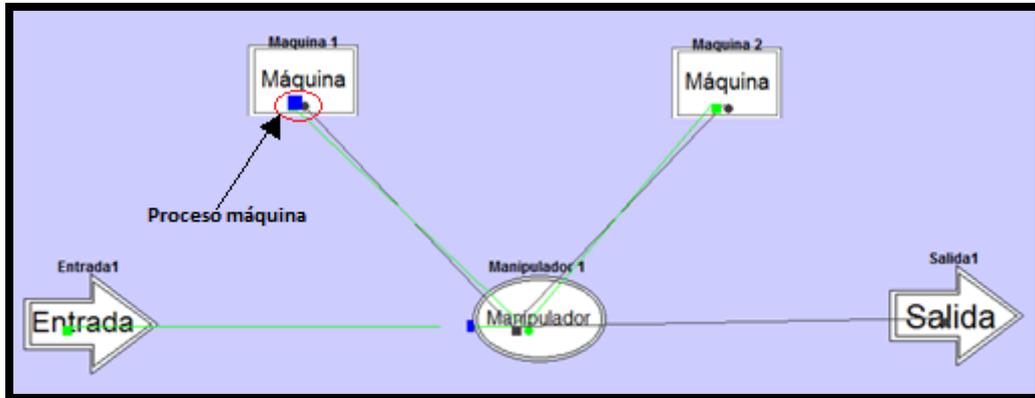


Figura 37. Proceso Máquina

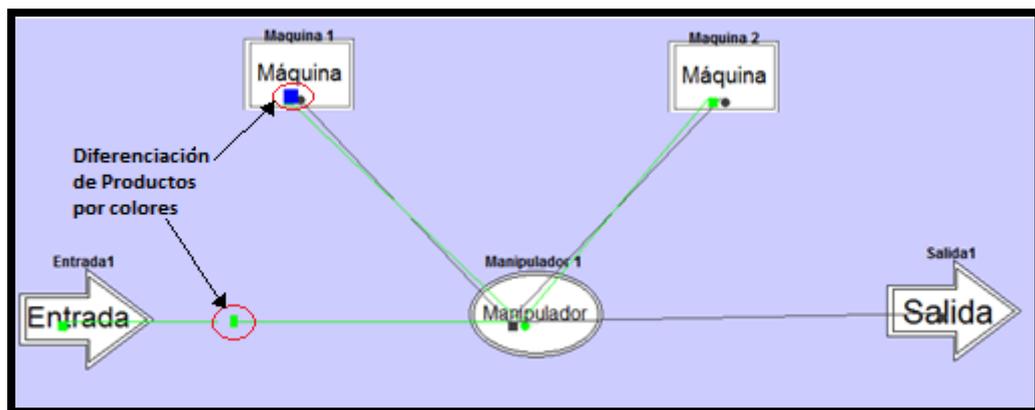


Figura 38. Diferenciación por colores

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1. Resolución Caso de Estudio

Este capítulo se centra en la prueba de resultados del Sistema del Simulador Gráfico que utiliza un modelo para resolver un Caso de Estudio en el que se debe programar cinco pedidos que cubre cinco tipos de partes diferentes para ser producidos en un Sistema de Manufactura Flexible, por lo cual el diseño del modelo está compuesto por dos tipos de máquinas distintas, de tipo A y tipo B. Las máquinas son preparadas una vez al día y deben estar disponibles por una producción continua.

El objetivo es programar y calcular el tiempo requerido para cada tipo de parte que se producirán en los siguientes días basados en los datos que se resumen en la Tabla 3.

Tabla 2. Datos del Problema

		Tiempo de Procesamiento por Unidad (min)	
Tipo de Parte	Tamaño de la Orden	Máquina Tipo A	Máquina Tipo B
A	5	3	1
B	10	12	0
C	25	7	4
D	10	2	1
E	4	3	2

A partir de los datos del Caso de Estudio se plantea el modelo que solucione los objetivos estipulados como se observa en la Figura 39.

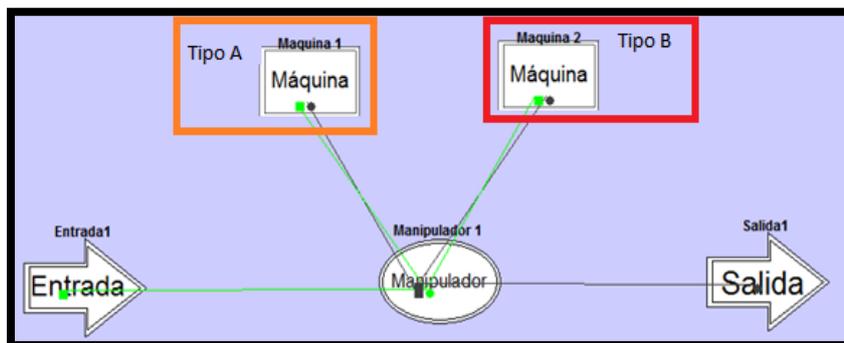


Figura 39. Modelo del Caso de Estudio

Según el orden establecido en la Tabla 3, se ingresará los datos al Simulador Gráfico en el mismo orden considerando que los tipos de lote a, b, c, d y e en el simulador cambian por números ordinales que empieza desde el 1 debido al formato del software, así como también la representación de las Máquina Tipo A y Tipo B cambian por Máquina 1 y 2.

Como se observa en la Figura 39, se seleccionaron las secuencias requeridas según las especificaciones de la Tabla 3 para cada lote, tomando en cuenta el uso de los Tipos de Máquina para formar dicha secuencia.

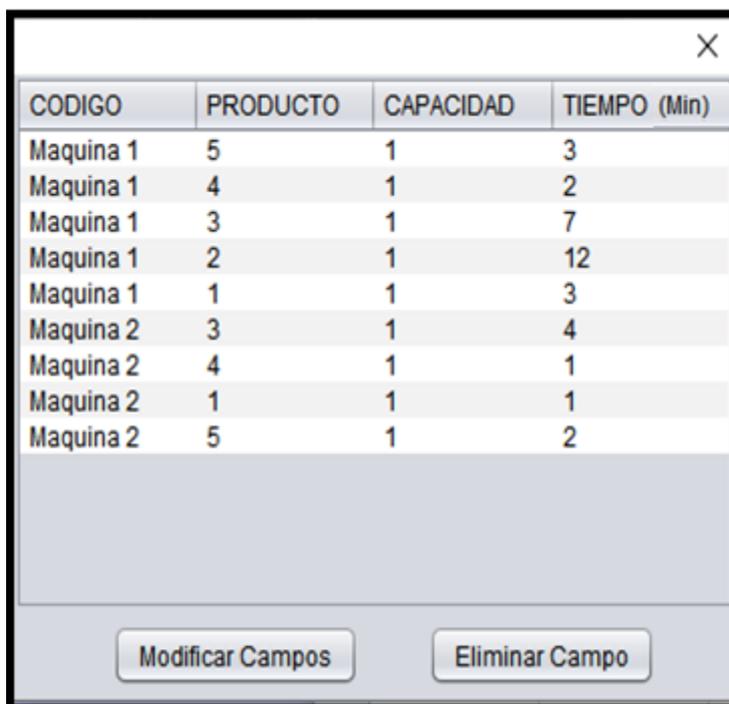
Cantidad Individual de Cada Producto		Operaciones						
PRODUC...	CANTIDAD	PROD...	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6
1	5	1	E1→R1	R1→M1	M1→R1	R1→M2	M2→R1	R1→S1
2	10	2	E1→R1	R1→M1	M1→R1	R1→S1		
3	25	3	E1→R1	R1→M1	M1→R1	R1→M2	M2→R1	R1→S1
4	10	4	E1→R1	R1→M1	M1→R1	R1→M2	M2→R1	R1→S1
5	4	5	E1→R1	R1→M1	M1→R1	R1→M2	M2→R1	R1→S1

Modificar Entrada

Figura 40. Secuencias del Modelo

En las propiedades de las Máquinas se ingresa los respectivos tiempos de proceso de la Tabla 3 para cada tipo de producto, se considera que Tipo de Máquina interviene en la secuencia de producción, esto se puede observar en la Figura 41 donde para el caso de los Tipos de Lotes

1, 3, 4 y 5 se emplea las dos máquinas (A y B) a excepción del Lote 2 el cual solo interviene la Máquina 1.



CODIGO	PRODUCTO	CAPACIDAD	TIEMPO (Min)
Maquina 1	5	1	3
Maquina 1	4	1	2
Maquina 1	3	1	7
Maquina 1	2	1	12
Maquina 1	1	1	3
Maquina 2	3	1	4
Maquina 2	4	1	1
Maquina 2	1	1	1
Maquina 2	5	1	2

Figura 41. Tiempo de Procesamiento por Unidad

Con los datos ingresados en Simulador Gráfico según el Caso de Estudio se inicio la simulación de los lotes de producción, se puede visualizar en el Elemento de Entrada del Modelo como se grafica la distribución de la materia prima en la cantidad necesaria del total de las piezas a producirse, además en la Salida del mismo se observa la acumulación de productos terminados de acuerdo a los lotes predeterminados, cabe señalar que en el proceso de ejecución de la simulación se diferencia cada uno de los tipos de productos por su color (Figura 42).

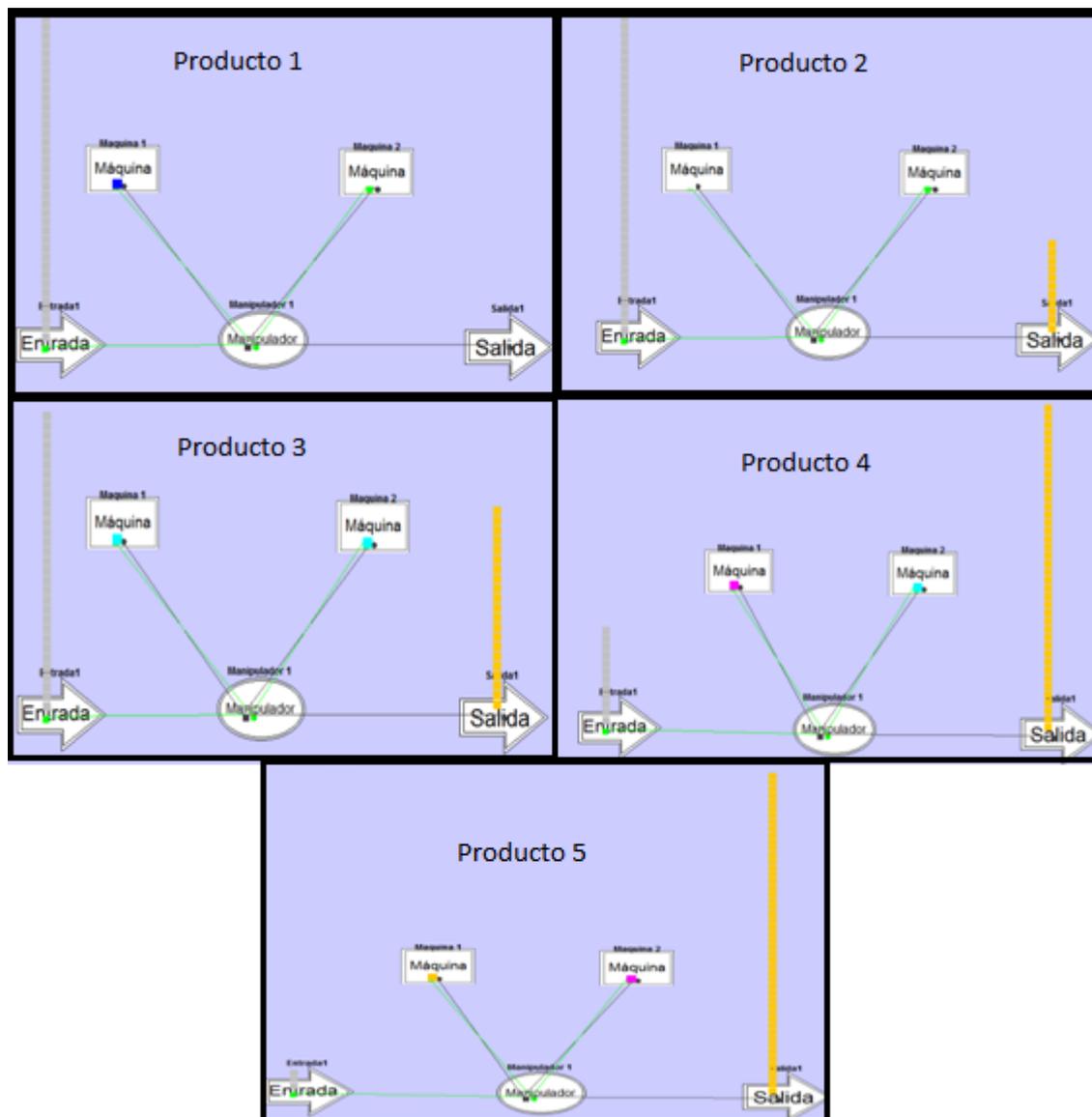


Figura 42. Proceso de Producción

5.2. Resultados de la Simulación

Al final de la simulación práctica del Caso de Estudio se obtuvo el tiempo total de producción de los lotes como se ve en la Figura 43 que para nuestro caso es de 5 horas 44 minutos y 2 segundos, además se exportaron los datos de tiempos de producto terminado y tiempos de cada máquina a un documento Excel (Tabla 4 y 5).

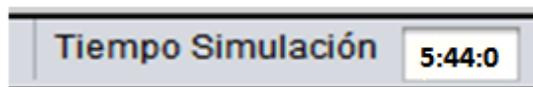


Figura 43. Tiempo Final de Simulación

Tabla 3.

Tiempos de Lotes

Número y Tipo de Producto	Tiempo	
	Inicio	Fin
Tipo Producto:1 Número de producto:1	0:00:0	0:04:0
Tipo Producto:1 Número de producto:2	0:03:0	0:07:0
Tipo Producto:1 Número de producto:3	0:06:7	0:10:0
Tipo Producto:1 Número de producto:4	0:09:0	0:13:0
Tipo Producto:1 Número de producto:5	0:12:0	0:16:0
Tipo Producto:2 Número de producto:1	0:15:0	0:27:0
Tipo Producto:2 Número de producto:2	0:27:0	0:39:0
Tipo Producto:2 Número de producto:3	0:39:0	0:51:0
Tipo Producto:2 Número de producto:4	0:51:0	1:03:0
Tipo Producto:2 Número de producto:5	1:03:0	1:15:0
Tipo Producto:2 Número de producto:6	1:15:0	1:27:0
Tipo Producto:2 Número de producto:7	1:27:0	1:39:0
Tipo Producto:2 Número de producto:8	1:39:0	1:51:0
Tipo Producto:2 Número de producto:9	1:51:0	2:03:0
Tipo Producto:2 Número de producto:10	2:03:0	2:15:0
Tipo Producto:3 Número de producto:1	2:15:0	2:26:0
Tipo Producto:3 Número de producto:2	2:22:0	2:33:0
Tipo Producto:3 Número de producto:3	2:29:0	2:40:0
Tipo Producto:3 Número de producto:4	2:36:0	2:47:0
Tipo Producto:3 Número de producto:5	2:43:0	2:54:0
Tipo Producto:3 Número de producto:6	2:50:0	3:01:0
Tipo Producto:3 Número de producto:7	2:57:0	3:08:0
Tipo Producto:3 Número de producto:8	3:04:0	3:15:0
Tipo Producto:3 Número de producto:9	3:11:0	3:22:0
Tipo Producto:3 Número de producto:10	3:18:0	3:29:0
Tipo Producto:3 Número de producto:11	3:25:0	3:36:0
		Continua
Tipo Producto:3 Número de producto:12	3:32:0	3:43:0
Tipo Producto:3 Número de producto:13	3:39:0	3:50:0
Tipo Producto:3 Número de producto:14	3:46:0	3:57:0
Tipo Producto:3 Número de producto:15	3:53:0	4:04:0
Tipo Producto:3 Número de producto:16	4:00:0	4:11:0
Tipo Producto:3 Número de producto:17	4:07:0	4:18:0
Tipo Producto:3 Número de producto:18	4:14:0	4:25:0
Tipo Producto:3 Número de producto:19	4:21:0	4:32:0
Tipo Producto:3 Número de producto:20	4:28:0	4:39:0
Tipo Producto:3 Número de producto:21	4:35:0	4:46:0

Tipo Producto:3 Número de producto:22	4:42:0	4:53:0
Tipo Producto:3 Número de producto:23	4:49:0	5:00:0
Tipo Producto:3 Número de producto:24	4:56:0	5:07:0
Tipo Producto:3 Número de producto:25	5:03:0	5:13:0
Tipo Producto:4 Número de producto:1	5:10:0	5:14:0
Tipo Producto:4 Número de producto:2	5:12:0	5:15:0
Tipo Producto:4 Número de producto:3	5:14:0	5:17:0
Tipo Producto:4 Número de producto:4	5:16:0	5:19:0
Tipo Producto:4 Número de producto:5	5:18:0	5:21:0
Tipo Producto:4 Número de producto:6	5:20:0	5:23:0
Tipo Producto:4 Número de producto:7	5:22:0	5:25:0
Tipo Producto:4 Número de producto:8	5:24:0	5:27:0
Tipo Producto:4 Número de producto:9	5:26:0	5:29:0
Tipo Producto:4 Número de producto:10	5:28:0	5:31:0
Tipo Producto:5 Número de producto:1	5:30:0	5:35:0
Tipo Producto:5 Número de producto:2	5:33:0	5:38:0
Tipo Producto:5 Número de producto:3	5:36:0	5:41:0
Tipo Producto:5 Número de producto:4	5:39:0	5:44:0

Tabla 4.

Tiempos para Máquinas

Producto	Máquina	Tiempo	
		Inicio	Fin
Producto1	M1	0:0:0	0:3:0
Producto1	M2	0:3:0	0:4:0
Producto1	M1	0:3:0	0:6:0
Producto1	M2	0:6:0	0:7:0
Producto1	M1	0:6:0	0:9:0
Producto1	M2	0:9:0	0:10:0
Producto1	M1	0:9:0	0:12:0
Producto1	M2	0:12:0	0:13:0
Producto1	M1	0:12:0	0:15:0
Producto1	M2	0:15:0	0:16:0
Producto2	M1	0:15:0	0:27:0
Producto2	M1		Continua
Producto2	M1	0:27:0	0:39:0
Producto2	M1	0:39:0	0:51:0
Producto2	M1	0:51:0	1:03:0
Producto2	M1	1:03:0	1:15:0
Producto2	M1	1:15:0	1:27:0
Producto2	M1	1:27:0	1:39:0
Producto2	M1	1:39:0	1:51:0
Producto2	M1	1:51:0	2:03:0
Producto2	M1	2:03:0	2:15:0
Producto3	M1	2:15:0	2:22:0
Producto3	M2	2:22:0	2:26:0

Producto3	M1	2:22:0	2:29:0
Producto3	M2	2:29:0	2:33:0
Producto3	M1	2:29:0	2:36:0
Producto3	M2	2:36:0	2:40:0
Producto3	M1	2:36:0	2:43:0
Producto3	M2	2:43:0	2:47:0
Producto3	M1	2:43:0	2:50:0
Producto3	M2	2:50:0	2:54:0
Producto3	M1	2:50:0	2:57:0
Producto3	M2	2:57:0	3:01:0
Producto3	M1	2:57:0	3:04:0
Producto3	M2	3:04:0	3:08:0
Producto3	M1	3:04:0	3:11:0
Producto3	M2	3:11:0	3:15:0
Producto3	M1	3:11:0	3:18:0
Producto3	M2	3:18:0	3:22:0
Producto3	M1	3:18:0	3:25:0
Producto3	M2	3:25:0	3:29:0
Producto3	M1	3:25:0	3:32:0
Producto3	M2	3:32:0	3:36:0
Producto3	M1	3:32:0	3:39:0
Producto3	M2	3:39:0	3:43:0
Producto3	M1	3:39:0	3:46:0
Producto3	M2	3:46:0	3:50:0
Producto3	M1	3:46:0	3:53:0
Producto3	M2	3:53:0	3:57:0
Producto3	M1	3:53:0	4:00:0
Producto3	M2	4:00:0	4:04:0
Producto3	M1	4:00:0	4:07:0
Producto3	M2	4:07:0	4:11:0
Producto3	M1	4:07:0	4:14:0
Producto3	M2	4:14:0	4:18:0
Producto3	M1	4:14:0	4:21:0
Producto3	M2	4:21:0	4:25:0
Producto3	M1	4:21:0	4:28:0
Producto3	M2	4:28:0	4:32:0
Producto3	M1	4:28:0	4:35:0
			Continua
Producto3	M2	4:35:0	4:39:0
Producto3	M1	4:35:0	4:42:0
Producto3	M2	4:42:0	4:46:0
Producto3	M1	4:42:0	4:49:0
Producto3	M2	4:49:0	4:53:0
Producto3	M1	4:49:0	4:56:0
Producto3	M2	4:56:0	5:00:0
Producto3	M1	4:56:0	5:03:0
Producto3	M2	5:03:0	5:07:0
Producto3	M1	5:03:0	5:10:0
Producto3	M2	5:10:0	5:12:0
Producto4	M1	5:10:0	5:13:0
Producto4	M2	5:12:0	5:14:0

Producto4	M1	5:12:0	5:14:0
Producto4	M2	5:14:0	5:15:0
Producto4	M1	5:14:0	5:16:0
Producto4	M2	5:16:0	5:17:0
Producto4	M1	5:16:0	5:18:0
Producto4	M2	5:18:0	5:19:0
Producto4	M1	5:18:0	5:20:0
Producto4	M2	5:20:0	5:21:0
Producto4	M1	5:20:0	5:22:0
Producto4	M2	5:22:0	5:23:0
Producto4	M1	5:22:0	5:24:0
Producto4	M2	5:24:0	5:25:0
Producto4	M1	5:24:0	5:26:0
Producto4	M2	5:26:0	5:27:0
Producto4	M1	5:26:0	5:28:0
Producto4	M2	5:28:0	5:29:0
Producto4	M1	5:28:0	5:30:0
Producto4	M2	5:30:0	5:31:0
Producto5	M1	5:30:0	5:33:0
Producto5	M2	5:33:0	5:35:0
Producto5	M1	5:33:0	5:36:0
Producto5	M2	5:36:0	5:38:0
Producto5	M1	5:36:0	5:39:0
Producto5	M2	5:39:0	5:41:0
Producto5	M1	5:39:0	5:42:0
Producto5	M2	5:42:0	5:44:0

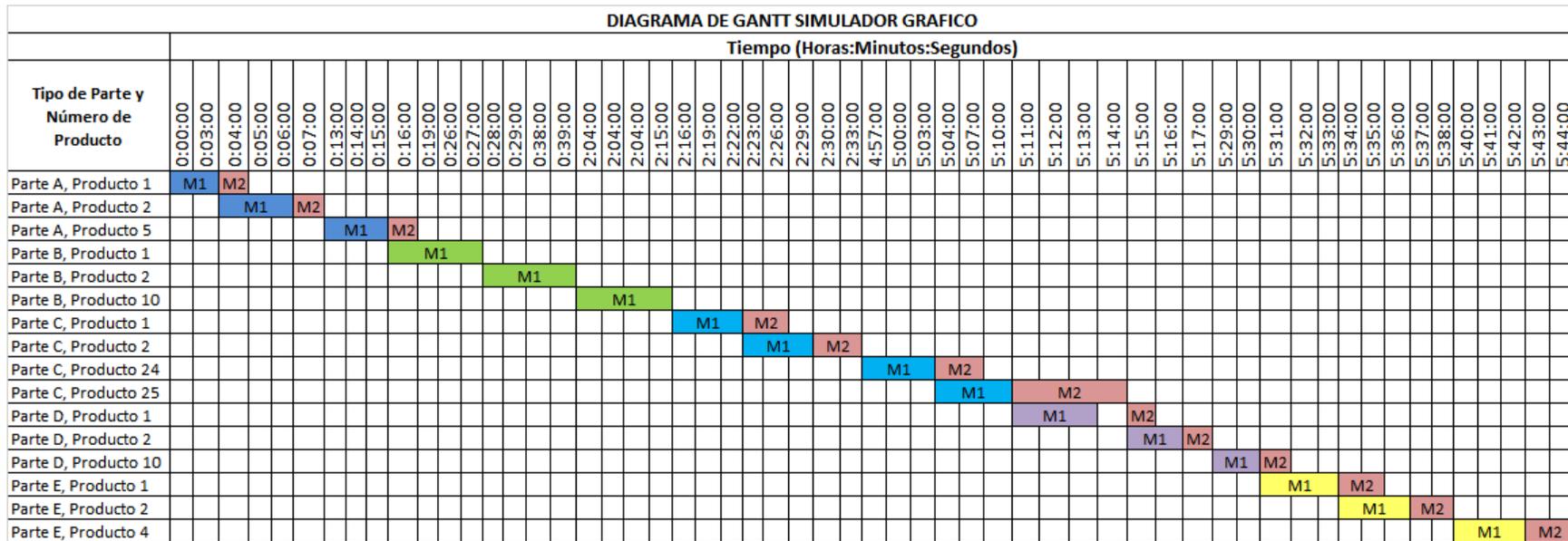
5.3. Análisis de las Simulaciones

Para el análisis de los resultados se dividirá los datos de las tablas obtenidas anteriormente en función de los Tipos de Productos con el fin de comprender mejor el funcionamiento del Simulador Gráfico.

Un diagrama de Gantt es una herramienta que se emplea para planifica, programar o analizar tareas a lo largo de un tiempo, por lo cual se hace uso de este para realizar el seguimiento de la fabricación de cada una de las partes producidas en forma de lotes.

Tabla 5.

Diagrama de Gantt Simulador Gráfico



Como se observa en la Tabla 6 en el Diagrama de Gantt, se comprueba que los datos ingresados en el Caso de Estudio fueron procesados correctamente por el Simulador Gráfico, cumpliendo con el pedido de cada uno de los lotes con un total de 54 productos de diferentes tipos (A, B, C, D y E) en un tiempo total de 5 horas 44 minutos.

Con ayuda del Diagrama de Gantt del Simulador se pudo obtener los tiempos de inicio y fin de cada uno de los 5 lotes producidos como se observa en la Tabla 7.

Tabla 6.

Tiempos de Producción por Lote

Producción de Lotes				
Número de Lote	Número de Productos	Tiempo de Inicio	Tiempo Final	Makespan
Lote 1	5	0:00:00	0:16:00	0:16:00
Lote 2	10	0:15:00	2:15:00	2:00:00
Lote 3	25	2:15:00	5:15:00	3:00:00
Lote 4	10	5:10:00	5:31:00	0:21:00
Lote 5	4	5:30:00	5:44:00	0:14:00

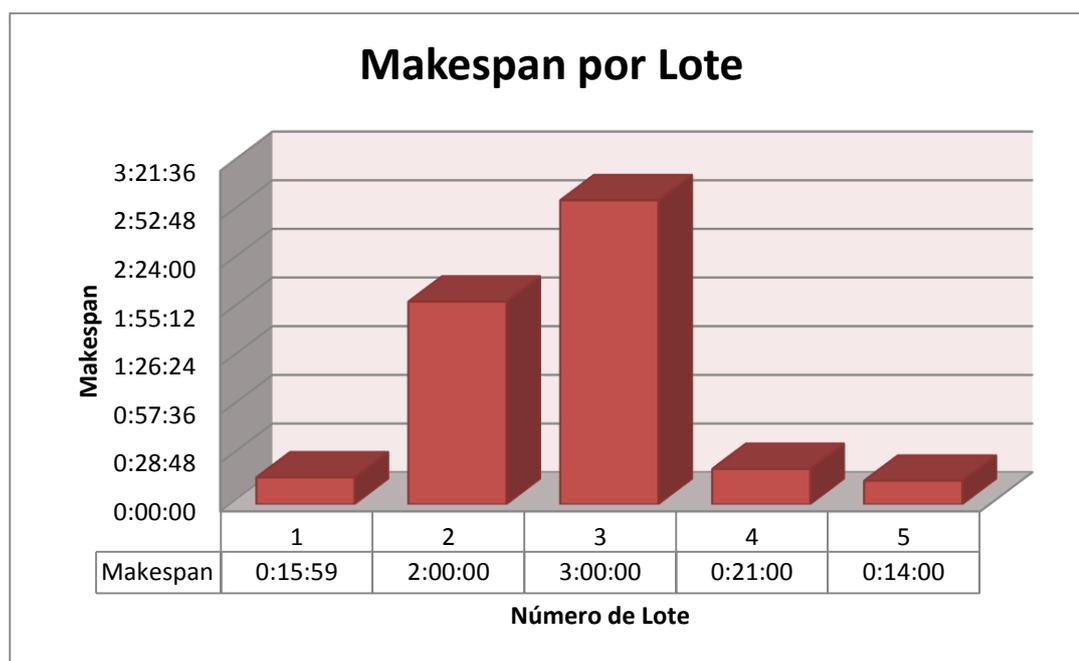


Figura 44. Makespan por Lote

En la Figura 44 se puede apreciar los Makespan de cada uno de los lotes con lo cual se puede determinar que para el Lote 1 se obtuvieron 5 productos terminados (tipo A) en un tiempo total de 15 minutos con 59 segundos.

Para el caso de lote 2, los requerimientos del pedido se cumplen satisfactoriamente obteniendo 10 productos terminados (tipo B), con un tiempo de

salida del lote es de 2 horas 15 minutos tomando en cuenta que este no es el tiempo total de producción de las piezas, ya que su proceso inicia a los 15 minutos por lo cual se obtiene un Makespan de 2 horas.

Para el caso de lote 3, se cumple el requerimiento de 25 piezas de la orden de producto tipo C, en este caso el Makespan del lote 3 es de aproximadamente 3 horas, considerando que el tiempo de inicio es de 2 horas 15 minutos y el tiempo finaliza en 5 horas 13 minutos.

La producción de este lote es de tan solo 10 productos de tipo D, a pesar los tiempos acumulados del proceso son altos el Makespan de este lote es de tan solo 21 minutos con un tiempo de inicio 5 horas con 10 minutos y finaliza a los 5 horas con 31 minutos.

Para el lote 5 el tamaño de pedido de producción es bajo debido al requerimiento es de tan solo 4 productos de tipo E, ya que al ser el último en producirse el tiempo final de este es considerado el tiempo final de la simulación con 5 horas 44 minutos, aclarando que su Makespan es de 14 minutos con un inicio en el tiempo de 5 horas 30 minutos.

Utilización de Máquinas

Con los datos obtenidos en la Tabla 5 se cálculo la utilización de cada máquina que intervino en el proceso de producción de cada lote como se pude observar a continuación.

En el Lote 1 se puede observar en la Figura 45 la utilización de dos Máquinas, Máquina 1 está activa un 93.75% del proceso de producción mientras que la Máquina 2 funciona un 31.25%.

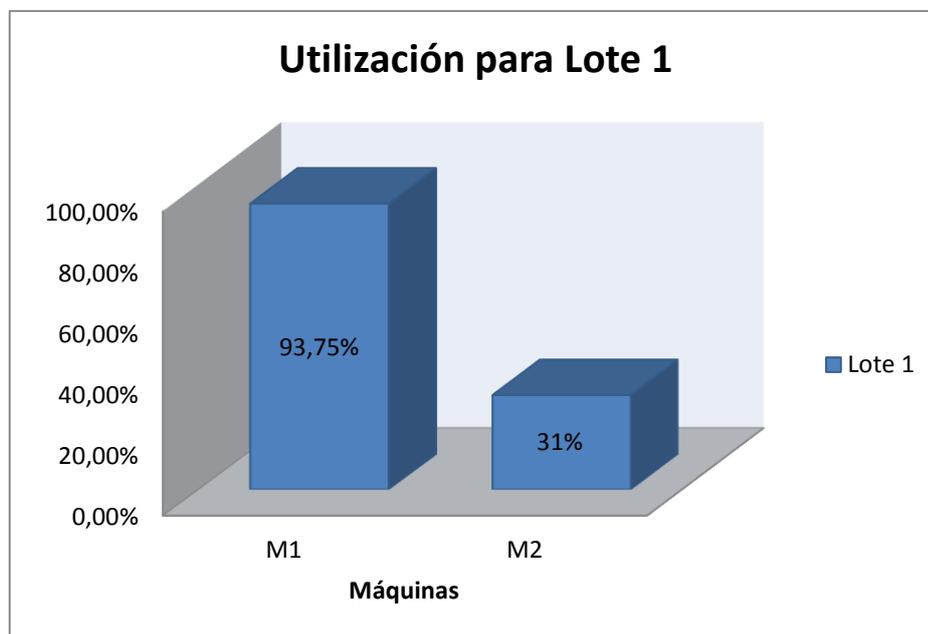


Figura 45. Utilización de Máquinas para Lote 1

La utilización para el Lote 2 está compuesta por una sola máquina, tal como se requiere en los datos de la tabla 3 y como se observa en la Figura 46, Máquina 1 está totalmente a cargo de todo el proceso, es decir trabaja al 100% en la elaboración de los productos.

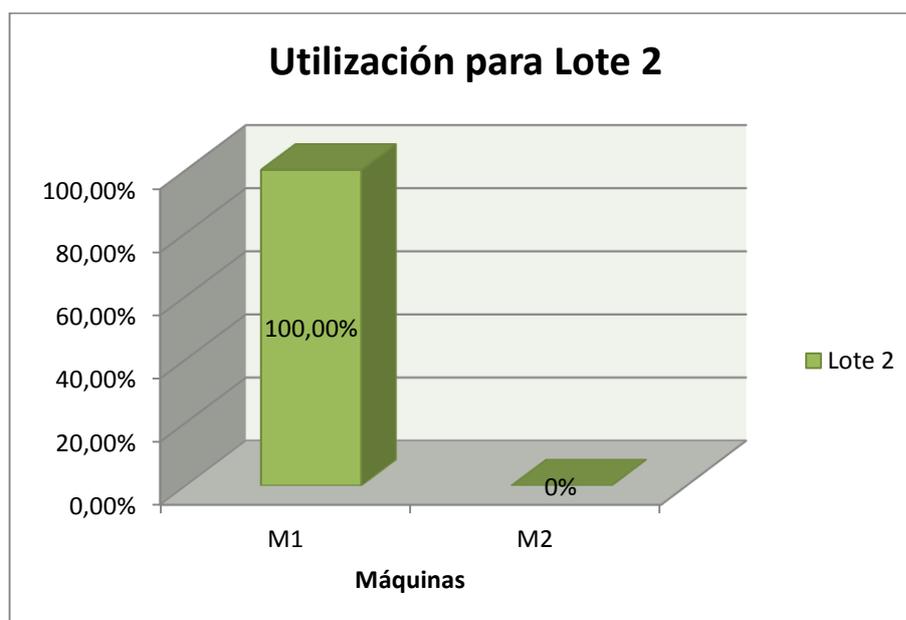


Figura 46. Utilización de Máquinas para Lote 2

En Lote 3 se emplea las dos Máquinas, donde la primera máquina ejecuta un 98.87% del proceso de este lote y la segunda se mantiene activa un 56.50%, hay que considerar que este lote es el que más tiempo emplea en el proceso de producción debido a los tiempos altos de trabajo de cada máquina.(Ver Figura 47)

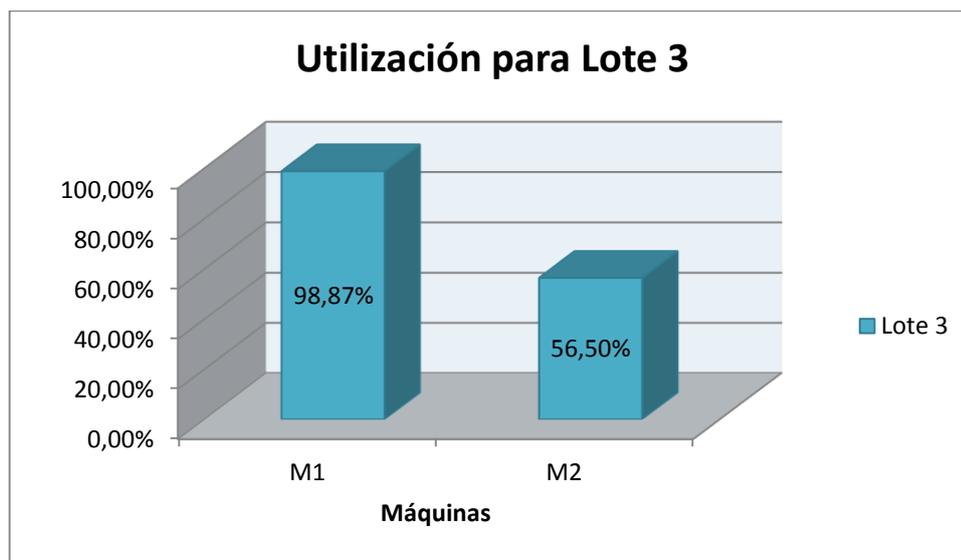


Figura 47. Utilización de Máquinas para Lote 3

En la figura 48 se observa el empleo de la máquina 1 con un porcentaje del 95.32%, también se observa el uso de la Máquina 2 con un porcentaje del 52.38% para la producción de las piezas indicadas para este lote.

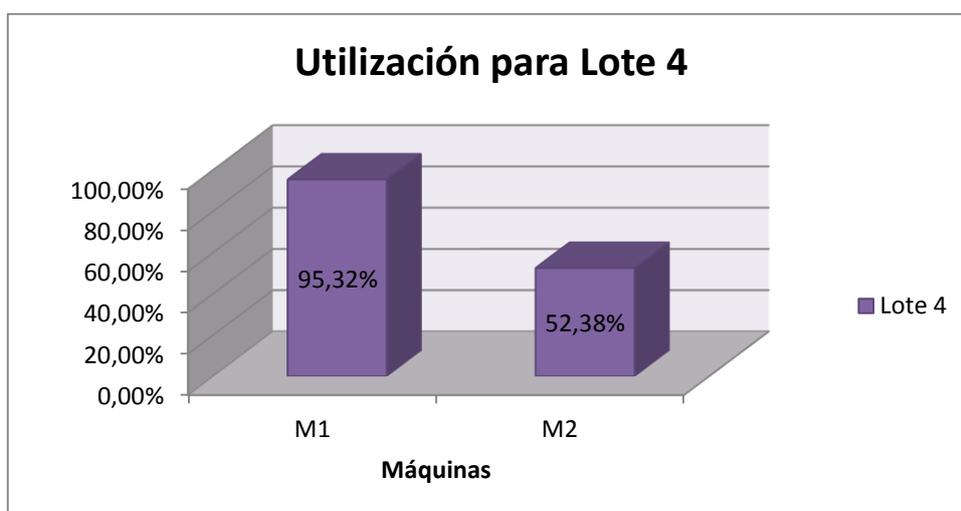


Figura 48. Utilización de Máquinas para Lote 4

En este ultimo lote también se hace uso de los dos tipos de máquinas siguiendo la línea de producción de los lotes anteriores en donde el porcentaje de uso de la Máquina 1 es mayor que el de la Máquina 2 con un 85.71% y 57.14% respectivamente. (Ver Figura 49)

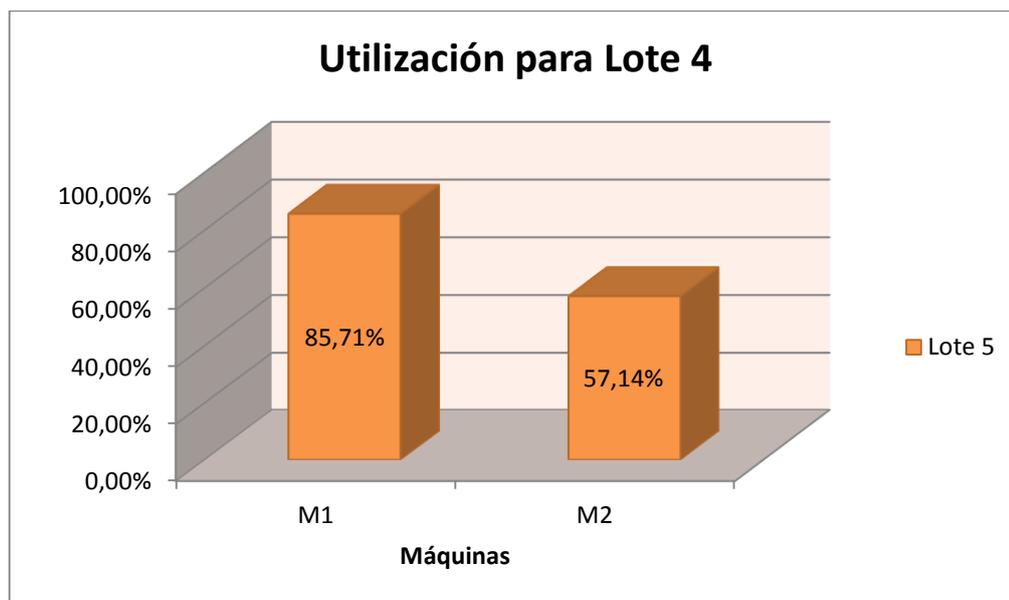


Figura 49. Utilización de Máquinas para Lote 5

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se determinó que con la información obtenida sobre el estado del arte de las diferentes investigaciones sobre los FMS basados en Redes de Petri son herramientas que facilitan la modelación y análisis de los sistemas mediante software de simulación para las diferentes industrias.
- Las Redes Petri son una herramienta de modelación muy utilizadas para representar sistema eventos discretos como los FMS, también nos facilitan comprender su funcionamiento mediante herramientas de análisis para tener la capacidad de diseñar y mejorar los sistemas.
- Este trabajo exhibe una herramienta de Simulación Gráfica basada en código abierto con el cual es posible evaluar dinámicamente el tiempo total acumulado de procesos para un Sistema Flexible de Manufactura considerando las características del modelado del sistema mediante Redes de Petri, además dicho modelo evalúa los tiempo de proceso de cada máquina y producto terminado en función de la secuencia establecida.
- El diseño del Simulador Gráfico basado en Redes de Petri con lenguaje de programación Java, presenta una interfaz gráfica muy sencilla en el entorno de desarrollo, por lo cual se tuvo que recurrir a software de diseño gráfico adicional para cumplir con las expectativas de tener una aplicación dinámica, interactiva y atractiva al usuario final.

- El uso de un Simulador Gráfico dentro de los FMS, resulta ser una importante herramienta de diseño, debido a que permite un esquema visual del proceso, permite un análisis del sistema en general, adicionalmente, permite utilizar los diseños implementados mediante Redes de Petri
- Utilizar un entorno de desarrollo con licencia libre, permite a los desarrolladores del proyecto mantener el software actualizado y con soporte, además de poder compartir el proyecto con otros desarrolladores

6.2. RECOMENDACIONES

- El proyecto presentado puede ser tomado como base para el desarrollo y mejora de un Simulador con altas prestaciones con ayuda de la comunidad de lenguaje libre al ser compartido de forma gratuita.
- Otra posible línea de investigación sería introducir más complejidad en el sistema, considerando nuevos aspectos como transporte de materiales, tiempos de preparación dependientes de la secuencia.
- Este trabajo hace alusión a una primera aproximación de la teoría de Redes de Petri por lo cual se plantea para trabajos posteriores la profundización de dicha teoría.
- El modelo planteado permite calcular el tiempo total de proceso de lotes para un Sistema de Manufactura Flexible según la secuencia establecida, sin embargo hace falta desarrollar mediante otras teorías, un algoritmo que permita encontrar la secuencia óptima del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

Fuentes de Conocimiento: Libros, revistas, Internet, Catálogos, otro.

- [1]. Alonso, J. (2011). *Creación e Implementación Base de Datos*. Madrid: Tutos4u.
- [2]. Chryssolouris, G. (2006). *Manufacturing Systems: Theory and Practice*.
- [3]. Díaz, F. (2011). *Tipos de Sistemas de Manufactura* . Cuautitlán Izcalli: México.
- [4]. Granda, M. (2012). *Redes de Petri: Definición, Formalización y Ejecución*. España: Universidad de Cantabria.
- [5]. Groove. (1990). *Sistemas Integrados de Manufactura*.
- [6]. Groover, M. P. (2002). *Automation, Production System, and Computer Integrated Manufacturing*. New Jersey: Prentice Hall Press Upper Saddle River.
- [7]. H. Hu, Y. L. (2015). *Modelling with Petri Nets of the Continuous Improvement in Production Systems*. China: Sch. of Electromech. Eng., Xidian Univ.
- [8]. Hernández, C. A. (2012). *Modelación de Células de Manufactura Flexible mediante Redes de Petri y Autómatas Celulares* . Hidalgo - México: Universidad del Estado de Hidalgo .
- [9]. Hernández, F. B. (2016). *Desarrollo de un Simulador Didáctico de Redes de Petri de Bajo Nivel*. México : Instituto Tecnológico de Celaya.
- [10]. Huayna, A. (2009). *Aplicaciones de las Redes de Petri a la simulación discreta de sistemas*. Lima: Revista de Ingeniería de Sistemas e Informática.
- [11]. Inmaculada, G. P. (2002). *Java Threads (Hilos Java)*. Salamanca: Universidad de Salamanca.

- [12]. Lara, J. (2012). *Dinámismo en Redes de Petri Coloreadas*. Castilla: Universidad de Castilla.
- [13]. M. Azaranga, E. G. (2013). *Simulación y Análisis de Modelos Estocásticos*. México: Unamerida.
- [14]. Macelo Aguilar, B. R. (2008). *Modeling and Analysis of Flexible Manufacture Systems through Hierarchical and Colores Petri Nets*. Brazil: Universidade do Amazonas .
- [15]. Mata, G., Méndez, A., Cardillo, J., & Chacón, E. (2016). Análisis de sistemas de manufactura contenido una exclusion mutual usando rede de Petri. *INGENIERIA UC*,
- [16]. Murillo, L. D. (2010). *Simulación de un sistema de Manufactura Flexible con Redes de Petri Coloreadas*. Costa Rica: Escuela de Ingeniería Electromecánica .
- [17]. Raimundez, C. (2012). *Redes de Petri Introducción Informal*. Brasil: ETSII-Vigo.
- [18]. Shannon, R. (1988). *Simulación de Sistema Diseño, Desarrollo e Implantación* . España: Trillas.
- [19]. Soto, L. M. (2010). *Simulación de un Sistema de Manufactura Flexible con Redes de Petri Coloreadas*. Costa Rica: Tecnología en Marcha.
- [20]. Sthipal, S. (1990). Flexibility in Manufacturing. *A survey International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol 2.
- [21]. Sugey Castro, J. C. (2011). *Simulación de Proceso Productivo en un Ambiente de Personalización Masiva a través de Redes de Petri*. Cali: Universidad del Valle.
- [21]. Varela, A. M. (2015). *Modelo de un Sistema de Producción Esbelto con Redes de Petri para Apoyar la Toma de Decisiones*. México D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- [22]. Y.Ramirez, J. M. (2014). Manufactura y Robótica. *Emaze*, 1-23.

[23]. Zhou, M. (2005). *Petri Net Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems*. Boston: Kluwer Academic Publishers.