



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla
Centro Interdisciplinario de Posgrados
Investigación y Consultoría
Departamento de Ingeniería y Tecnologías de Información
Doctorado en Sistemas Integrados de Manufactura y
Estrategias de Calidad

Modelado de Fallas en un Sistema Flexible de Manufactura utilizando
Redes de Petri y Modelos Virtuales

Tesis que para obtener el Grado de Doctor
en Sistemas Integrados de Manufactura y Estrategias de Calidad

Presenta
Eduardo Lebano Pérez



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Doy Gracias a mi Dios por todas las bendiciones que dio a mi vida para hacer éste proyecto una realidad ya que sin él nada habría sido posible.

A mi Esposa Liliana por su amor y paciencia estos años.

A mi Madre por sus consejos y apoyo incondicionales que son siempre vitaminas a mi alma.

A mis amigos, compañeros de trabajo, becarios y alumnos, de quienes he aprendido tanto y que siempre han estado ahí apoyando y sufriendo junto conmigo y muchas veces a causa de mí. Gracias por su valiosa ayuda en el desarrollo de ésta investigación.

A UPAEP que me dio la oportunidad de desarrollarme y vivir ésta nueva etapa en mi vida profesional.

ÍNDICE

Introducción	8
Hipótesis	9
Objetivos	9
Justificación	10
1. Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS) y su evolución	11
1.1. Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS) en definición	12
1.2. El desempeño del FMS en la actualidad	16
1.3. Siguiendo generación de Sistemas de Manufactura	20
1.3.1. Sistemas Reconfigurables	21
1.3.2. Sistemas Inteligentes	22
1.3.3. Sistemas Holónicos	23
1.4. Flexibilidad y su importancia	25
1.4.1. Componentes y características en un FMS	27
1.4.2. Tipos	32
1.4.3. Formas de medir la flexibilidad	37
1.5. Tipos de Fallas en un FMS	40
1.5.1. Fallas Duras	41
1.5.2. Fallas Suaves	41
2. Métodos de análisis de Sistemas Flexibles de Manufactura	42
2.1. Grafos de estado	43
2.2. Redes de Petri	45
2.2.1. Tipos	47
2.2.2. Modelado con PN	48
2.2.3. Modelado de Secuencias para PLCs utilizando Redes de Petri.	56
2.3. Simulación de FMS	58
2.3.1. Simulación con QUEST®	60
3. Sistema experimental y su modelo virtual	64
3.1. Celda de Manufactura	65
3.1.1. Centro de Maquinado CNC	66
3.1.2. Centro de Torneado CNC	66
3.1.3. Robot Articulado y Riel aéreo	68
3.1.4. Sistema de transporte.	69
3.1.5. Almacén cartesiano	69
3.1.6. Sistema de comunicación y control	71
3.2. Modelo Petri del FMS de UPAEP	72
3.2.1. Modelo PN del sistema	74
3.2.2. Modelo FMS UPAEP	75
3.2.3. Modelo Virtual	78
3.2.4. Creación y representación de dispositivos y estaciones.	78
3.2.5. Productos para la fabricación (CATIA)	80

4. Simulación de escenarios del modelo virtual	82
4.1. Modelo actual	83
4.2. Representación del Moldeo	88
4.2.1. Obtención de resultados	92
4.3. Modelo Propuesto A. Fallas probabilísticas programadas	94
4.3.1. Representación del modelo	94
4.3.2. Obtención de resultados	96
4.4. Modelo propuesto B. Fallas por eventos programadas.	97
4.4.1. Representación del modelo	98
4.4.2. Obtención de resultados	99
4.5. Propuesta de Control	101
Conclusiones	103
Anexos	106
Bibliografía	149

Índice de Figuras y Tablas

Figura 1.1. Relación de la CIM con el FMS a través de un enfoque por categorías	11
Figura 1.2. Esquema que presenta la definición conceptual de una máquina inteligente y reconfigurable	22
Figura 1.3. Conexiones de la red de comunicación en un FMS típico	30
Figura 1.4. Arquitectura del control de una celda de manufactura que muestra la Integración Vertical y la Integración Horizontal en un FMS.	30
Figura 1.3. Relación entre diferentes tipos de FMS, número de partes diferentes y producción anual de partes.	31
Figura 1.4. Subsistemas de un FMS.	32
Figura 1.5. Componentes del sistema de procesamiento del FMS.	32
Figura 1.6. Componentes del sistema de suministro de materiales.	33
Figura 1.7. Configuración de un FMS con Layout en Línea.	34
Figura 1.8. Configuración de un FMS con Layout cerrado.	34
Figura 1.9. Configuración de un FMS con Layout en escalera y Layout de campo abierto.	35
Figura 1.10. Configuración de un FMS con Layout con Robot al centro.	35
Figura 1.11. Sistema de detección de fallas mediante sensores y sistemas de control y medición de torque.	40
Figura 2.1. Sistema de ensamble robótico (a) Dos estados dos eventos, (b) Cuatro estados cuatro eventos.	42
Figura 2.2. Modelos de estado para un sistema con dos brazos robots para ensamble. (a) 3 estados 4 eventos, (b) 11 estados 16 eventos	43
Figura 2.3. Representación gráfica de una PN. 3 posiciones, 2 transiciones	44
Figura 2.4. (a) Estado inicial de la PN, marcación m ; (b) Nuevo estado de la PN, marcación m' .	45
Figura 2.5. Tipos de PN según Pohang University of Science & Technology.	46
Figura 2.6. (a) Modelo PN y su (b) Gráfica de alcanzabilidad.	47
Figura 2.7. Relaciones básicas. (a) Secuencial, (b) Concurrente, (c) Conflicto, (d) Cíclicos, (e) Mutuamente exclusivos.	50
Figura 2.8. Módulos comúnmente usados en el modelado de FMS. (a) Recurso/ Operación, (b) Mantenimiento periódico de Recurso/ Operación, (c) Falla de Recurso/ Operación, (d) Prioridad, (e) Re-trabajo.	53
Figura 2.9. Ejemplo de la unión entre diferentes módulos para un modelo PN completo.	54
Figura 2.10. Ejemplo de una secuencia automatizada para trasladar cajas utilizando un PLC y equipos neumáticos.	55
Figura 2.11. Modelo en PN del proceso de traslado de cajas (m_0).	56
Figura 2.12. Modelo en PN del proceso de traslado de cajas (m_1, m_2, m_3, m_4, m_5).	56
Figura 2.13. Programa en lenguaje de escalera para el proceso de traslado de cajas.	57
Figura 2.14. Formas de analizar un sistema.	58

Figura 2.15. Reglas para el flujo de entidades en el modelo.	60
Figura 2.16. Reporte de resultados del modelo.	61
Figura 2.17. Reporte de resultados de un elemento.	61
Figura 3.1. FMS LPAIC de UPAEP.	64
Figura 3.2. Componentes principales de la fresadora EMCO del FMS de UPAEP.	65
Figura 3.3. Principales características de la fresadora EMCO del FMS de UPAEP.	65
Figura 3.4. Componentes principales de la fresadora EMCO del FMS de UPAEP.	66
Figura 3.5. Principales características de la fresadora EMCO del FMS de UPAEP.	66
Figura 3.6. Componentes principales del Robot Articulado FMS de UPAEP.	67
Figura 3.7. Principales características del robot articulado del FMS de UPAEP.	68
Figura 3.8. Robot y riel en montaje tipo gantry del FMS de UPAEP.	68
Figura 3.9. Bandas transportadoras y elevadores para estaciones.	69
Figura 3.10. Almacén cartesiano de 30 bahías.	70
Figura 3.11. Esquema de control de estaciones y transferencia de datos en el FMS de UPAEP	70
Figura 3.12. Modelo PN para el almacén cartesiano	71
Figura 3.13. Modelo PN para las bandas transportadoras.	72
Figura 3.14. Modelo PN para las bandas transportadoras.	72
Figura 3.15. Modelo PN del FMS de UPAEP.	73
Figura 3.16. Modelo PN del FMS de UPAEP, Secuencia de disparos.	74
Figura 3.16. Modelo PN del FMS de UPAEP, Secuencia de disparos. Continuación.	75
Figura 3.17. Equipos de fabricación virtuales del FMS de UPAEP	77
Figura 3.18. Equipo de traslado de materiales en la celda del FMS de UPAEP	77
Figura 3.19. Equipo de traslado de materiales en la celda del FMS de UPAEP	78
Figura 3.20. Pieza T1_Fam1 y sus operaciones de manufactura en Torno CNC	79
Figura 3.21. Pieza M1_Fam2 y sus operaciones de manufactura en Torno CNC	80
Figura 4.1. Rompimiento de cadenas por esfuerzos a máxima velocidad en bandas.	85
Figura 4.2. Celda de fabricación representada en QUEST®.	87
Figura 4.3. Definición del tiempo de fabricación en el Torno.	87
Figura 4.3. Definición de las características de operación del Robot Gantry.	88
Figura 4.3. Definición de características y rutas para las bandas transportadoras.	89
Figura 4.4. Proceso de desempaquetado de entidades para transporte en bandas.	89
Figura 4.5. Tiempo de traslado y empaquetado para colocar en bandas.	90
Figura 4.6. Conexión entre estaciones para el flujo y secuencia de operaciones.	90
Figura 4.7. Porcentajes de utilización de los equipos en 8 horas de fabricación sin fallas.	91
Figura 4.8. Resumen de datos al final de la corrida con fallas programadas con distribución de probabilidad y el estado obtenido para la fresadora CNC.	92
Figura 4.9. PN del FMS de UPAEP con modelado de fallas programadas con distribuciones de probabilidad.	94
Figura 4.10. Porcentajes de utilización de los equipos en 8 horas de fabricación con fallas programadas por distribuciones de probabilidad.	95
Figura 4.10. Resumen de datos al final de la corrida y el estado final en la fresadora CNC en el	96

modelo con fallas probabilísticas.	
Figura 4.11. PN del FMS de UPAEP con modelado de fallas programadas según la secuencia o acumulación de eventos.	97
Figura 4.12. Porcentajes de utilización de los equipos en 8 horas de fabricación con fallas programadas por eventos.	98
Figura 4.12. Resumen de datos al final de la corrida con fallas programadas por eventos y el estado obtenido para la fresadora CNC.	99
Figura 4.13. Propuesta de control centralizado y supervisorio para el control de fallas probabilísticas o por eventos.	100
Figura 4.14. Esquema de control y monitoreo de estaciones con protocolo de comunicación PROFIBUS y PLCs Master Class 1 de Siemens®.	101
Tabla 1.1. Ejemplo de sistemas FMS y algunas de sus características más representativas. Fuente [30].	17
Tabla 1.2. Categorías para los sistemas de manejo de materiales. Fuente [12]	30
Tabla 2.1. Interpretación para los elementos de una PN.	50
Tabla 2.2. Conceptos en la Manufactura y su equivalente para el modelado usando PN.	50
Tabla 3.1. Marcaciones del Modelo PN del FMS de UPAEP.	77
Tabla 3.2. Marcaciones del Modelo PN del FMS de UPAEP.	77
Tabla 4.1. Tiempos de desplazamiento y desviaciones en la posición frente a la plataforma 2.	84
Tabla 4.2. Tiempos de desplazamiento y velocidades según distancia recorrida en las bandas transportadoras.	85
Tabla 4.3. Tiempos de carga y descarga de vagones de las bahías del almacén.	87
Tabla 4.4. Tiempos de desplazamiento en el almacén cartesiano del FMS de UPAEP.	87

INTRODUCCIÓN

La constante búsqueda de formas cada vez más eficientes y productivas de fabricar productos y el uso de los avances tecnológicos han derivado en el desarrollo de propuestas de sistemas de manufactura tan prometedoras como los Sistemas Flexibles de Manufactura y la Manufactura Integrada por Computadora. En la actualidad se ha reconocido que no existe un patrón de desempeño o incluso de configuración para éstos sistemas ya que la tecnología los cambia constantemente y abre nuevas y ambiciosas oportunidades de desarrollo.

Los futuros sistemas de manufactura son prometedores y los niveles de flexibilidad e integración se compaginan con características de reconfiguración ágil, de independencia o autonomía de operación y con la transformación de simples dispositivos de control a componentes dotados de un nivel de inteligencia. Uno de los puntos importantes en cualquier sistema de manufactura es garantizar la continuidad de las operaciones creando entornos seguros y condiciones que eviten las fallas durante la operación de las estaciones. Existen muchos factores que propician las fallas en cualquier sistema de manufactura como por ejemplo complejidad de las operaciones y su relación directa con el número de familias de parte que pueden manejar los equipos. Si se establece una relación entre la aparición de la falla y las operaciones previas será posible crear eventos o acciones preventivas para disminuir el tiempo de paro por fallas en los equipos y aumentar la utilización de los mismos.

En éste proyecto primero se hace una recopilación de las principales características de los Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS) y las propuestas de su comportamiento en el futuro, dando así una idea de las características de sus componentes. También se identifican el tipo de fallas que pueden ocurrir en un sistema de ésta naturaleza. En la segunda parte se presentan los principales métodos de análisis y modelado de FMS así como las ventajas de utilizar programas de simulación en tres dimensiones para facilitar el análisis del comportamiento del sistema y además, asignar las características de los equipos de forma muy precisa. En la tercera parte se presentan las características del FMS de UPAEP que es el sistema de estudio en éste proyecto. Se crea su Red de Petri y los modelos virtuales así como las familias de partes. Por último se verifica el comportamiento en la simulación y se crean los modelos con fallas para evaluar su comportamiento y crear un modelo del control que se requerirá en el FMS de UPAEP para llevarlo a un nivel propuesto por los sistemas del futuro.

Adicionalmente se propone el modelo como inicial para la familiarización del sistema y su operación en actividades de capacitación u operación a distancia.

HIPÓTESIS

La creación de un modelo de simulación de las condiciones ó secuencia de eventos que anteceden a una falla en una Celda o Sistema Flexible de Manufactura permitirá una mejor comprensión de la ocurrencia de fallas y acciones correctivas que darán mayor estabilidad y flexibilidad al sistema.

OBJETIVOS

General

Proponer un modelo de una Celda ó un Sistema Flexible de Manufactura mediante la determinación de las condiciones, eventos y secuencias potenciales de falla (fallas duras o suaves) y su validación mediante el modelado con Redes de Petri y simulación utilizando modelos virtuales tridimensionales que permitan la flexibilidad de modelado de las condiciones en un Sistema Flexible de Manufactura.

Específicos

- Presentar un panorama actual de los Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS) y las propuestas de evolución que tienen como objetivo mejorar las principales condiciones de operación y arquitectura que los distinguirán de los sistemas actuales así como resaltar las investigaciones relacionadas a la mejora de su desempeño.
- Presentar las principales condiciones de Flexibilidad en un FMS y su importancia en las operaciones de manufactura así como el análisis del Sistema Flexible de Manufactura Didáctico LPAIC (Laboratorio de Procesos Automatizados Integrados por Computadora) de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (FMS UPAEP).
- Identificar las principales condiciones de falla del FMS UPAEP que determinan su desempeño en Flexibilidad e integración.
- Desarrollar un modelo de análisis utilizando Redes de Petri que permita la identificación de las principales condiciones de falla en la ejecución de una secuencia de actividades en el FMS UPAEP.
- Crear un modelo tridimensional del sistema LPAIC mediante la red de Petri que represente su estructura, operación y condiciones de falla utilizando QUEST D5 para la visualización de condiciones y ejecución de escenarios de fabricación.
- Comparación de los escenarios de operación y análisis de resultados para determinar las consecuencias de la ejecución de fallas en el sistema.

JUSTIFICACIÓN

Los Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS) han evolucionado en los últimos 20 años y han sido motivo de un gran número de desarrollos e investigaciones. La flexibilidad del sistema ha sido uno de los temas más abordados ya que su capacidad y desempeño depende de ésta condición. Lograr que un FMS responda a los cambios del entorno se ha logrado al incluir en su arquitectura dispositivos, equipos y máquinas que incrementan su flexibilidad en operaciones específicas como el procesamiento de materiales, el traslado de piezas, el almacenamiento, la inspección, el monitoreo y control de las operaciones.

La diversidad de equipos y las tecnologías que en ellos se aplican crean un sistema con una arquitectura de operación única que refleja la capacidad de ser flexible y su nivel de integración. Por ésta misma razón existen condiciones de falla que son propias de la arquitectura y que afectarán de manera grave o transitoria la operación del sistema. Las fallas en un FMS pueden ser de tipo transitoria pero al ocurrir pueden detener el funcionamiento de un dispositivo, una máquina y lo más grave subsistemas completos o todo el sistema. Existen fallas denominadas suaves que ocurren de manera aleatoria y que no representan en el momento de su aparición grandes afectaciones al sistema y que incluso pueden llegar a ser imperceptibles. Estas fallas al ocurrir frecuentemente pueden llegar a transformarse en fallas duras.

La detección de las fallas suaves utilizando métodos de prevención como el modelado y simulación de condiciones de operación del sistema permitirá determinar las acciones preventivas e incluso predictivas que disminuirán la ocurrencia de fallas transitorias.

El sistema LPAIC de UPAEP (Laboratorio de Procesos Automatizados Integrados por Computadora) será el modelo de estudio ya que su arquitectura básica permite analizar de manera ágil las condiciones de operación y las acciones ó escenarios propuestos que resultarán del modelado en redes de Petri y QUEST® D5. El resultado de éste análisis ayudará a visualizar los dispositivos, equipos, máquinas o estrategias de mejora que se podrían implementar en el sistema garantizando un funcionamiento acorde a los Sistemas Flexibles de Manufactura.

Capítulo 1

Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS)
y su evolución

1.1. Sistemas Flexibles de Manufactura (FMS) en definición

El término Sistema Flexible de Manufactura (FMS) tuvo origen en Londres en los años 60's cuando David Williamson, un ingeniero investigador y desarrollador, concibió el nombre y el concepto que fue plasmado en un prototipo llamado System 24, debido a que el objetivo del sistema era mantenerse funcionando durante las 24 horas del día. La característica principal de este sistema era la combinación de versatilidad de las máquinas controladas numéricamente con un nivel relativamente bajo de intervención humana. Con el desarrollo de las nuevas tecnologías computacionales el concepto de FMS ha ido evolucionando rápidamente. Este sistema primeramente tenía la función de la manufactura de piezas de tipo "volumen-medio" y "variedad-media", pero actualmente estos sistemas no solo se dedican a la función de manufactura de piezas sino también al ensamble y a procesos.

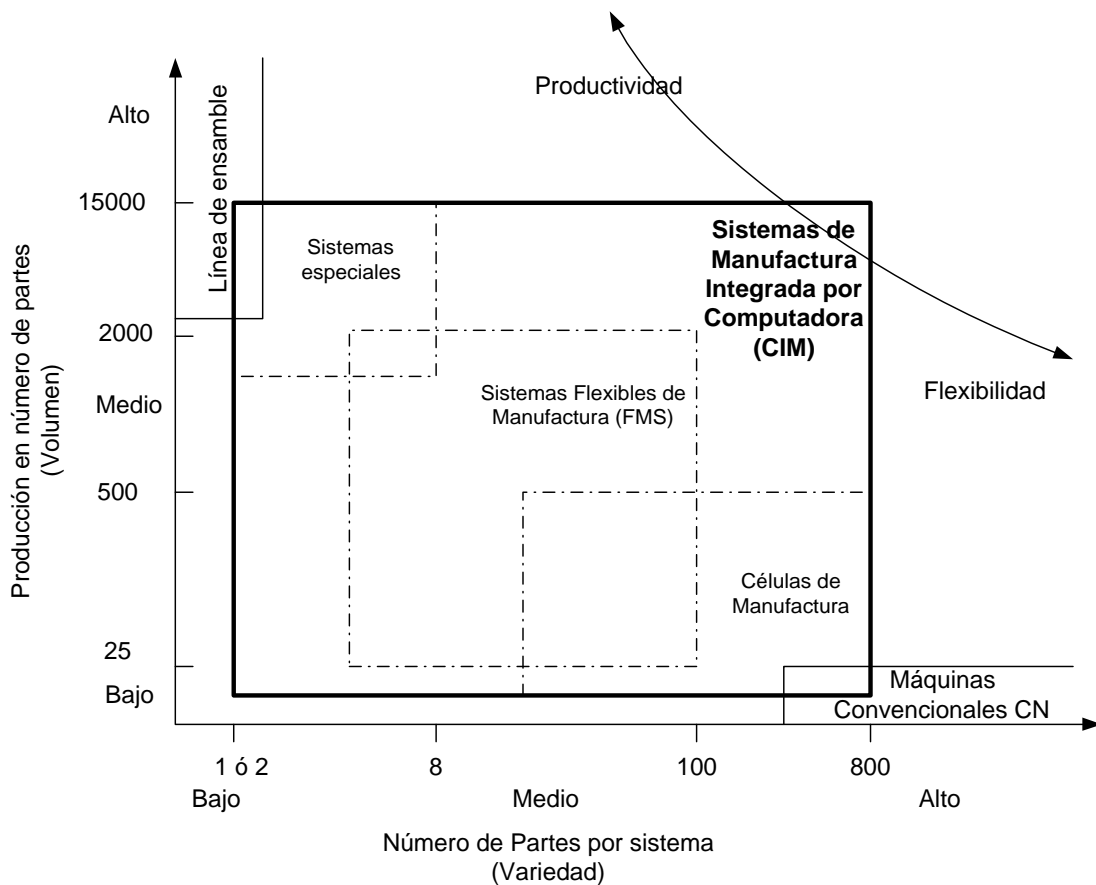


Figura 1.1. Relación de la CIM con el FMS a través de un enfoque por categorías.

El FMS ha sido un método muy eficiente en la reducción de problemas de manufactura ya que no es solo una solución técnica sino que permite reducir los tiempos muertos, el nivel de inventarios, adaptarse a los cambios de la demanda, además de que en ciertas condiciones de flexibilidad, productividad y control permite incrementar su efectividad de manufactura.

Mucho de lo que hace un FMS lo podemos entender a través de analizar las definiciones del mismo que también nos permiten visualizar su evolución. A continuación se presentan varias definiciones del FMS así como sus principales características constitutivas.

Luggen[20] presenta las siguientes definiciones de FMS:

El gobierno de Estados Unidos define el FMS como: Una serie de máquinas herramienta automáticas ó equipos de fabricación conectados mediante sistemas automáticos de manejo de materiales, una computadora digital jerárquica y preprogramada para el control, y el suministro para la fabricación aleatoria de piezas o ensambles que están organizados en familias predeterminadas.

Kearney and Tracker:

Un FMS es un grupo de máquinas herramienta de control numérico que pueden procesar aleatoriamente un grupo de piezas, utilizando manejo de materiales automático y una computadora central de control para dinámicamente balancear la utilización de los recursos de tal forma que el sistema pueda adaptarse automáticamente a los cambios en la producción de pieza, mezclas y niveles de salidas.

FMS es un sistema de carga automática aleatoria basado en la manufactura con tecnología de grupos (GT) integrando una computadora de control y a un grupo de máquinas para producir y manejar automáticamente piezas para un proceso en serie continuo.

FMS combina la microelectrónica y la ingeniería mecánica para proporcionar una economía de escala a el trabajo por lotes. Una computadora central “en línea” controla las máquinas herramienta, otras estaciones, y al sistema de transporte de herramientas y componentes. La computadora también se encarga del monitoreo y proporciona información para el control. Esta combinación de flexibilidad y control total hace posible la producción de una gran variedad de productos en pequeñas cantidades.

Edward A. Ross Associates, Inc. definen al FMS como:

Un sistema de manufactura constituido al menos por dos máquinas herramienta, un sistema de manejo de materiales que permita un alto grado de automatización en la carga y descarga, y una computadora que controle el sistema de tal manera que funcione para la manufactura de cualquier número de piezas únicamente al cambiar el software.

La FMS Workshop, CASA/SME definen al FMS como:

Un sistema de manufactura integrado que controla y desarrolla procesos o series de procesos sobre una familia de partes utilizando el control por computadora, estaciones flexibles, y manejo de materiales integrado.

Un FMS es una configuración controlada por computadora y consiste de uno o más módulos y un sistema de manejo de materiales diseñada para maquinar más de un número de piezas a niveles de volumen bajos a medios.

Greenwood[12] define al FMS como:

Un sistema Flexible de Manufactura es una estructura controlada por computadoras, las cuales establecen comunicación y control sobre todos los elementos involucrados en el proceso de manufactura de un producto y que responde de manera rápida, eficiente, económica e integral a los cambios significativos del medio...un sistema de este tipo está integrado por un grupo de computadoras para el control de estaciones semi-independientes unidas por sistemas automatizados de manejo de materiales.

Maleki[30] define al FMS como:

Un sistema de manufactura controlado por computadora usando máquinas semi-independientes de control numérico unidas entre sí por medio de una red de manejo de materiales.

Un sistema flexible de manufactura es un sistema integrado por computadoras usando una red de control para monitorear y controlar el equipo de producción y las actividades.

Groover[13] presenta su definición del FMS de la siguiente manera:

Un sistema flexible de manufactura es una celda de maquinado con Tecnología de Grupos altamente automatizada que consiste en un grupo de estaciones de procesamiento (generalmente máquinas herramienta CNC, por control numérico computarizado) interconectadas mediante un sistema automatizado de manejo y almacenamiento de materiales, y controladas por medio de un sistema integrado de computadoras. Un FMS es capaz de procesar una amplia variedad de estilos de partes simultáneas bajo un programa de control numérico en diferentes estaciones de trabajo.

En general se plantea, a través de las definiciones, que un FMS utiliza la tecnología de control, de fabricación y los métodos de producción para ajustarse de manera flexible a la demanda de productos de variedad y volumen medio.

Sin embargo, el proceso de diseño de un FMS implica un gran número de consideraciones tanto técnicas como económicas, que pueden agruparse en tres bloques: Variables de decisión, Restricciones, y Objetivos del sistema.

Entre las principales variables de decisión que deben considerarse al diseñar un FMS están:

El subgrupo de piezas que se producirán en el FMS.

Tipo de pieza.

Volumen de producción.

Secuencia de operación (rutas y planes de proceso).

Mezcla de planes de proceso, en caso de que una pieza pueda ser fabricada en diferentes áreas de carga de las máquinas.

Componentes del FMS.

Tipo y número de máquinas CNC (Control numérico).

Tipo y número de estaciones de carga y descarga.
Tipo y capacidad de los sistemas de transportación de piezas y herramientas.
Tipo y número de áreas de almacenamiento temporal y almacén.
Tipo y capacidad del sistema de suministro de herramientas.
Tipo y número de plantillas y palets.
Distribución en planta del FMS.
Tipo de sistemas computacionales y de la estructura del sistema de planeación y control.
Número y cualidades del personal.

Muchas de estas variables son interdependientes, por ejemplo el tipo y número de piezas a ser producidas por el FMS determina el tipo y número de operaciones que debes llevarse a cabo y ellas determinan el tipo y número de máquinas y la capacidad de transportación requerida.

Por otro lado, si se consideran las restricciones del sistema para determinar su posible configuración, estas se pueden ver desde el punto de vista de restricciones de entrada y de salida. Las restricciones de entrada se asocian con los volúmenes de inversión para la producción. Las restricciones de salida de un FMS están dadas por los volúmenes de producción por unidad de tiempo. Es decir, las restricciones en un FMS se determinan desde los niveles elevados de la dirección ya que es ahí donde se diseña el sistema según los objetivos, misión y visión que se desea de la organización, además del tipo de mercado al que se estarán ofreciendo los productos del sistema.

Estas restricciones pueden traducirse en requerimientos tecnológicos específicos para lograr la manufactura de las piezas, por ejemplo la compatibilidad de los equipos, es decir, las características y capacidades del equipo que se usará y que puede ser de diferentes fabricantes. Si se considera que los equipos interactuarán y se coordinarán para lograr un objetivo, es necesario que las condiciones que propicien esto estén presentes, que los sistemas de control sean compatibles y que los protocolos de comunicación sean estándares, además, debe considerarse la utilización de equipos modulares que pueden elevar el monto de la inversión. Otra restricción no menos importante es en el espacio destinado para la instalación del FMS. Estas y otras restricciones deben observarse con detalle al tratar de diseñar e implementar un FMS.

Finalmente, los objetivos que deben plantearse en la introducción de un FMS y su configuración se dividen en dos tipos principales:

Objetivos Originales: Los planteados para la transición de un sistema convencional a un FMS, es decir, aquellos objetivos que ya existen y que serán adaptados al nuevo sistema. Estos objetivos son:

Alta adaptabilidad a los cambios de tipo de productos y volúmenes.
Bajo costo laboral.
Elevada calidad del producto mediante procesos más precisos.
Mayor productividad a través de una mejor utilización de los recursos.

Objetivos Derivados: Objetivos propuestos durante el diseño de la configuración del FMS, es decir, aquellos que surgen durante la planeación del sistema. Estos objetivos son:

Volúmenes de producción elevados y tiempos de entrega cortos.

Elevada utilización de los recursos.

Bajo nivel de inventario en proceso.

Bajos costos de inversión (considerando que es parte de un sistema convencional)

Estas consideraciones hechas por el autor son propuestas como guía para una transición de un sistema de manufactura convencional (por procesos, por producto, de taller o por lotes, etc.) a un FMS. Sin embargo, estas solo representan el inicio de la transición, ya que el proceso de implementación ó instalación del FMS requiere de otras actividades y consideraciones las cuales son abordadas por Greenwood[12] y por Tempelmeier [37] pero que en éste trabajo no se considerarán.

1.2.El desempeño del FMS en la Actualidad

La tecnología aplicada en un FMS es similar a la utilizada en la manufactura celular pero su desempeño es aún mayor debido a la automatización aplicada en él y en las múltiples estaciones de procesamiento unidas por rutas variables de manejo de materiales. Su flexibilidad le permite desempeñarse como un sistema mixto, con variabilidad y volúmenes de piezas.

El FMS puede procesar piezas por lotes o familias de partes y tener volúmenes medios de producción entre 5000 a 75000 unidades anuales¹ ya que un nivel por debajo de éste rango hace muy costoso mantener el sistema y un nivel por arriba del rango requería un tipo de sistema especializado para garantizar la producción.

Las operaciones de maquinado son comúnmente realizadas por un FMS pero también existen sistemas con procesos de prensado, laminados, forja y operaciones de ensamble. En un FMS de maquinado básicamente consiste en una estación de almacenaje, robots de carga y descarga, centros de torneado, centros de fresado, sistemas de transporte automatizados y dispositivos de control y monitoreo. Las piezas de tipo rotacional o prismática pueden ser muy pesadas o delicadas para la manipulación humana, por lo que es indispensable utilizar vagones ó pallets que alimentan y descargan a las máquinas como por ejemplo tornos o fresadoras controladas numéricamente (CNC) y para su almacenaje. Las operaciones de fresado en piezas prismáticas en un FMS requieren de mayor tiempo y operaciones por lo que el tiempo tacto es mayor que en las piezas prismáticas. Garantizar la máxima eficiencia en el uso de los equipos al fabricar productos de una o varias familias de partes ha resultado en sistemas con operaciones de maquinado mucho más maduros que en sistemas con aplicaciones de procesamiento diferente.

A continuación se presentan las principales características de algunos FMS:

¹ Groover

	FMS #1	FMS #2
Dueño	Vought Aerospace, Dallas, Texas.	Cincinnati Milacron Plastics Machinery Division.
Industria	Aeroespacial.	Equipo para procesamiento de plásticos.
Producto	Partes componentes del fuselaje de aeronaves.	Partes para máquinas de procesamiento de plásticos.
Proveedor	Cincinnati Milacron.	Cincinnati Milacron
Puesta en marcha	1984	1984
EQUIPOS		
Centros de Maquinado	8 centros de maquinado con 90 torretas de herramientas.	Cuatro Centros de maquinado CNC con 90 torretas de herramientas con sistema automatizado de entrega y reemplazo.
Manejo de materiales	Vehículos Guiados Automáticamente (AGV).	Tres AGVs con la capacidad de transporte de 2.3 ton. cada uno.
Computadoras	Operación mediante redes locales de computadoras (LAN).	Computadora maestra y una para coordinar una CMM.
Inspección	Dos máquinas de medición por coordenadas (CMM).	Una CMM con interfase al sistema de manejo de materiales del FMS para la inspección en proceso.
Otros equipos	Unidades de carga de baterías; dos estaciones de 10 palets de carga y descarga; estación de inspección manual; unidad de limpieza de piezas; equipo automatizado de remoción de virutas.	Unidades de carga de baterías; dos estaciones de 10 palets de carga y descarga; unidad de limpieza de piezas; sistema centralizado de refrigeración y recuperación.
Capacidad de Software	Módulos de software para la planeación, control de tráfico, ubicación de herramientas, para el proceso de producción, y sistema de simulación.	Módulos de software para la planeación, control de tráfico, ubicación de herramientas, para el proceso de producción, y sistema de simulación.
NIVEL DE FLEXIBILIDAD		
Variedad	600 piezas.	Procesamiento aleatorio de 200 piezas diferentes.
Volumen	Cada una de las 600 piezas cada 5 días.	-----
Descripción	Forma: Prismática. Material: Aluminio y acero.	Forma: Prismática. Material: Acero colado.

Tabla 1.1. Ejemplo de sistemas FMS y algunas de sus características más representativas. (Continua...) Fuente [30].

	FMS #3	FMS #4
Dueño	Badger Meter, Milwaukee, Wisconsin.	Cummins Engine, Columbus, Indiana.
Industria	Manufactura.	Automotriz.
Producto	Diferentes tipos de resguardos para trenes.	Partes para motores disel.
Proveedor	Kearny & Trecker Corporation, Milwaukee, Wisconsin.	Kearny & Trecker Corporation, Milwaukee, Wisconsin.
Puesta en marcha	1986	1984
EQUIPOS		
Centros de Maquinado	2 Centros de Maquinado horizontales con 120 herramientas cada una.	6 Centros de maquinado horizontales con torretas de 110 herramientas.
Manejo de materiales	Vehículos Guiados Automáticamente (AGV), con sistema de espera.	Sistema de AGVs.
Computadoras	Operación mediante redes locales de computadoras (LAN).	Control del FMS diseñado por Kearny & Trecker Corporation.
Inspección	Máquina de medición en línea; inspección manual.	Sistema de medición en línea, y sistema CMM fuera de línea.
Otros equipos	30 centros de espera en cola de palets, dos centros de carga y descarga, rociado de piezas en máquina.	Lectores de códigos de barras para el monitoreo e identificación de herramientas.
Capacidad de Software	Los módulos de software proporcionan control supervisorio en tiempo real del movimiento de palets, materiales, plantillas, datos de la estación de herramientas, planeación de producción, ruta de proceso y operación de las estaciones.	Módulos de Software escritos en Pascal que proporcionan monitoreo en tiempo real del movimiento de palets, materiales, plantillas, datos de herramientas, planes de producción, ruta de procesos y operación de las estaciones.
NIVEL DE FLEXIBILIDAD		
Variedad	110 piezas diferentes.	Dos familias diferentes de partes.
Volumen	2 piezas por hora.	10 piezas por hora.
Descripción	Forma: Prismática. Material: Latón y acero.	Forma: Prismática. Material: Hierro Modular.

Tabla 1.1. (...Continuación) Fuente [30].

Como se observó en la Tabla 1.1 existen similitudes en los sistemas y cada una de sus características define la flexibilidad en volumen y variedad de piezas que se pueden fabricar en él, pero también existen otros beneficios al utilizar un FMS como sistema de manufactura, entre los más representativos están²:

- *Aumenta la utilización de las máquinas (80% a 90%)*: Al poder trabajar las 24 horas del día, por los cambios automáticos de herramienta, estaciones de almacenamiento en proceso e intercambio rápido de piezas y la programación dinámica de la producción.
- *Reducción de espacio requerido en la planta (40% a 50%)*: Por la organización celular del sistema se aprovecha mejor el espacio y se reducen los recorridos.
- *Mejor respuesta a los cambios (Flexibilidad)*: Los dispositivos y equipos altamente flexibles permiten que se hagan cambios en el programa de producción de tal manera que en pocas horas el sistema reacciona a éstos cambios.
- *Reducción en inventarios*: Debido a que las piezas de una o varias familias son procesadas al mismo tiempo en lugar de procesarlas por lotes, el trabajo en proceso (WIP, Work In Process) es menor lo que implica un menor manejo de inventarios desde la entra hasta la salida del producto.
- *Reducción de los tiempos de espera*: al reducir el tiempo en el procesamiento de la pieza se logra un tiempo de entrega menor al cliente.
- *Reducción del personal*: Tasas de producción elevadas y menor intervención de operadores resulta en un ahorro del 30% al 50% en personal.
- *Producción desasistida*: El alto nivel de automatización permite operar un FMS sin atención humana por largos periodos de tiempo.

En la operación de un FMS se pueden presentar varios problemas en la operación del mismo que tienen un efecto significativo en la operación flexible del sistema. Según Groover[20] los problemas más representativos en un FMS están relacionados con:

- Planes de Producción y envíos.
- Carga de producción en Máquinas.
- Ruta de piezas en el sistema.
- Agrupación de piezas.
- Administración de herramientas.
- Manejo y ubicación de pallets y sistemas de sujeción.

El tránsito de piezas en el sistema, las operaciones de manufactura que en ellas se realizan y el control de las cantidades y rutas que deben seguir los productos pueden ocasionar fallas si no se tienen sistemas de monitoreo y prevención de condiciones potenciales de error.

Las nuevas propuestas de FMS pretenden disminuir esas condiciones de error y garantizar la continuidad de las operaciones y por supuesto el cumplimiento de las especificaciones del producto y de los volúmenes y variedades de producción. A continuación se presentan estas propuestas de evolución del FMS.

² Groover

1.3.Siguiente Generación de Sistemas de Manufactura.

Al incrementar la variedad y el volumen de producción derivado del constante aumento de la demanda de productos nuevos, innovadores y de alta calidad las organizaciones de manufactura necesitan responder de forma eficiente y rápida. Para lograr que sus plantas productivas respondan al mercado actual se invierte en investigación sobre nuevas tecnologías que den mayor flexibilidad.

Se plantea también vencer los paradigmas que se han establecido en la mayoría de los sistemas de manufactura, y que menciona Wienclaw[46] como:

1. Los sistemas especializados de manufactura están diseñados para utilizar tecnología fija en los procesos en condiciones estables de demanda, lo que permite la fabricación limitada de productos.
2. Las celdas y sistemas flexibles de manufactura están diseñados para producir algunos tipos de productos bajo condiciones predecibles del mercado y usando procesos adaptables.

Para tener éxito al afrontar las nuevas exigencias del mercado los sistemas de manufactura también requerirán avances significativos en las tecnologías que los constituyan. Las áreas donde estas tecnologías deberán desarrollarse han sido definidas por Rodríguez y Molina [45] como:

1. Equipos integrados y adaptables así como procesos y sistemas que puedan ser reconfigurables.
2. Procesos de manufactura que minimicen los desperdicios y el consumo de energía.
3. Procesos innovadores para diseñar y manufacturar nuevos materiales y componentes.
4. Biotecnología para la manufactura.
5. Sintetización de sistemas, modelado y simulación de todas las operaciones de manufactura.
6. Tecnologías que puedan convertir la información en conocimiento para la toma de decisiones.
7. Métodos de diseño de procesos y productos que puedan cubrir con todas las especificaciones del producto.
8. Mejorar las interfaces Hombre-Máquina.
9. Métodos de entrenamiento y capacitación que permitan una rápida asimilación del conocimiento.
10. Software colaborativo para sistemas inteligentes.

Al vencer los paradigmas y desarrollar las áreas tecnológicas es posible imaginar y crear nuevas propuestas de sistemas de fabricación. A continuación se presentan los sistemas Holónicos, los Reconfigurables y los Inteligentes.

1.3.1. Sistemas Reconfigurables

La producción en masa proporcionó formas innovadoras de crear productos en serie y de calidad, y conforme los clientes fueron más exigentes en el tipo y características de los productos se hicieron adaptaciones tecnológicas a los procesos que les permitieron responder a esas demandas. Poco a poco se fue incrementando la capacidad y eficiencia de los procesos de fabricación y se puso mayor énfasis en la Flexibilidad de las operaciones y equipos que a través de metodologías como la Tecnología de Grupos y la Manufactura Celular se fue logrando.

Desde ese momento surgieron los Sistemas Flexibles de Manufactura capaces de realizar una amplia gama de operaciones. La implementación de éste sistema ha sido siempre enfocándose en la aplicación de costosos equipos y dispositivos altamente automatizados para incrementar su flexibilidad a través del aumento de la capacidad instalada, sin proveer un nivel de inteligencia suficiente para aumentar directamente su flexibilidad.

Los sistemas de producción en masa utilizan también alta tecnología y han logrado un manejo significativo de variedad en sus productos y en los últimos años han hecho lo que fue uno de los principales objetivos planteados por el FMS. Ahora bien, la nueva generación de sistemas de manufactura pretenden responder de manera rápida y eficiente al dilema costo – flexibilidad en un FMS.

Las nuevas tecnologías hacen posible la rápida reprogramación de equipos, procesos y sistemas que ayudarán a crear una amplia gama de productos de manera ágil y sin costos excesivos. Una de las propuestas que hacen uso de estas ventajas son los Sistemas Reconfigurables que tienen los siguientes atributos, Rodríguez y Molina [45]:

1. Diseñados para proveer la capacidad de producción y satisfacer las necesidades del mercado.
2. Actualizados con nueva tecnología
3. Reconfigurables rápidamente para fabricar nuevos productos o cambios en los volúmenes de producción.

En estos sistemas el elemento principal son las Máquinas Herramientas Reconfigurables, diseñadas para producir en variedad y volúmenes al configurarlas de forma personalizada. Estas máquinas serán fáciles de construir, mantener, actualizar y operar, entre otras características que definirán estos equipos según Wienclaw [46] son:

- a. Modulares
- b. Intercambiables
- c. Convertibles
- d. Diagnosticables
- e. Personalizables

Para lograr la flexibilidad éstos equipos deberán ser rápidamente diseñados, capaces de reconfigurarse para producir nuevos modelos en las cantidades solicitadas por la demanda y

con la posibilidad de integrar nuevas tecnologías que aumenten su flexibilidad sin la necesidad de invertir en nuevos equipos con tecnología similar pero a elevados costos de implementación, operación y mantenimiento.

Existen condiciones inesperadas que resultan en fallas no controladas por el FMS y que a pesar de lo avanzado de los equipos, dispositivos ó sistemas implementados, desestabilizan su operación afectando la flexibilidad e integración. La propuesta para pronosticar o mitigar los efectos de éstas condiciones es agregar “inteligencia” al FMS.

1.3.2. Sistemas Inteligentes

La inteligencia será una característica importante de los futuros equipos de manufactura que les dará la habilidad de adaptarse a los cambios de condiciones o del entorno de manufactura y de la demanda. Algunas de las condiciones inciertas a las cuales se enfrentarán los sistemas inteligentes son [45]:

- a) Eventos inesperados que pueden ser internos como falla de componentes y externos como cambios impredecibles en el entorno.
- b) Información incompleta, inconsistente o poco confiable.

Según Molina las características más aceptadas y asociadas con la inteligencia en la manufactura son las siguientes:

- 1) La habilidad del sistema para actuar de forma apropiada en un ambiente incierto.
- 2) Desarrollar tareas antropomórficas con la intervención mínima del operador.
- 3) La habilidad de percibir deliberar acerca de los objetos del entorno.
- 4) Un sistema que usa y combina modelos
- 5) Proporciona una solución al problema de encontrar la secuencia correcta de decisiones y control del sistema.
- 6) La capacidad de adquirir y aplicar conocimiento.
- 7) Autonomía, auto mantenimiento, aprendizaje y reproducción.

Lo anterior nos permite pensar que un sistema que tenga alguna de éstas características podrá desempeñar sus operaciones con cierto nivel de inteligencia, desde el nivel donde el sistema puede responder a problemas específicos hasta donde se alcanza una similitud con el comportamiento humano.

La propuesta entonces es que el FMS del futuro incorpore nuevas tecnologías que le permitan reconfigurar de manera continua su arquitectura de operación y control aumentando su flexibilidad sin hacer grandes inversiones en dinero y tiempo, además, estarán dotados de “Agentes inteligentes” capaces de monitorear y controlar las operaciones del sistema interactuando continuamente para responder de forma eficiente y eficaz a problemas específicos que le permitan inferir mediante el aprendizaje de situaciones pasadas los futuros eventos perjudiciales al sistema.

A continuación se presenta un esquema de una máquina inteligente y reconfigurable planteada por Molina [45].

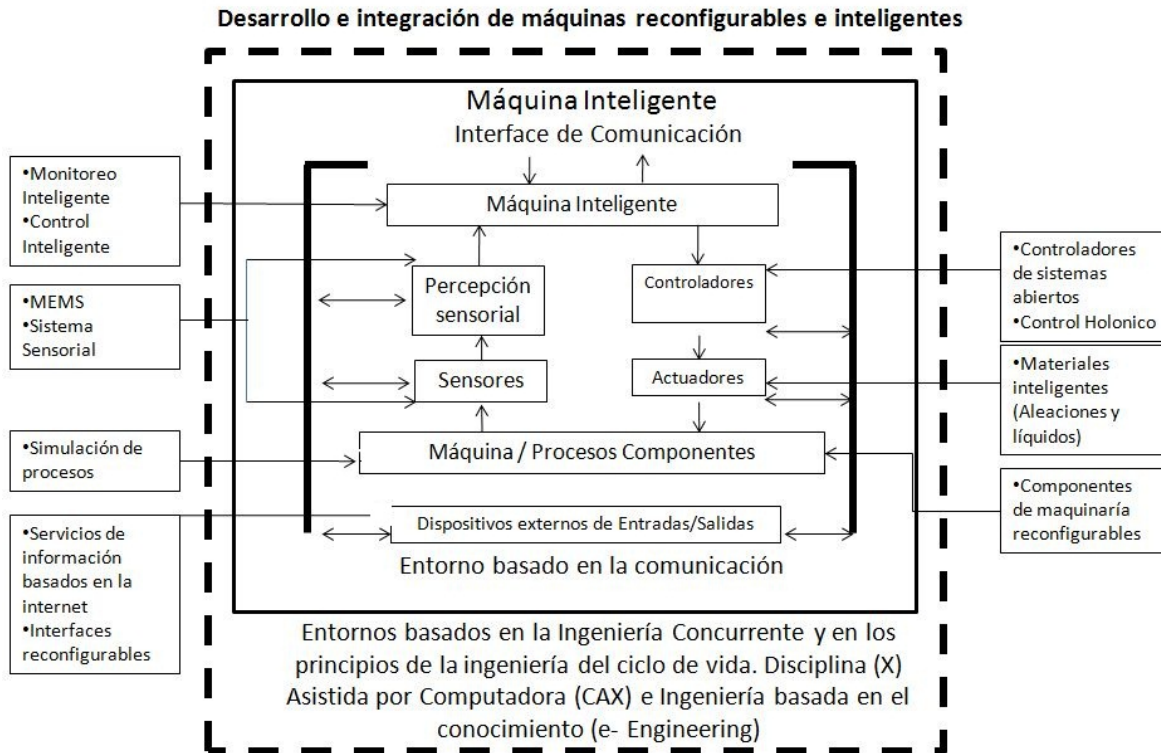


Figura 1.2. Esquema que presenta la definición conceptual de una máquina inteligente y reconfigurable. Fuente [45]

1.3.3. Sistemas de Manufactura Holónicos

Los Sistemas de Manufactura Holónicos (Holonc Manufacturing Systemes, HMS) se originaron en el marco de la quinceava presentación de las investigaciones del programa de Sistemas de Manufactura Inteligente (IMS) que es una propuesta del Prof. Yoshikawa de la Universidad de Tokio cuyo objetivo inicial fue crear la Ciencia para la Manufactura que pueda visualizar las necesidades de la industria del siguiente siglo.

El objetivo que se pretende obtener de un HMS es similar a los conceptos desarrollados por Koestler para el comportamiento de organismos y de organizaciones sociales como pueden ser la estabilidad frente a los disturbios internos o externos, adaptación y flexibilidad al cambio y la eficiencia en el uso de recursos disponibles, con el propósito de obtener conceptos adecuados para las industrias manufactureras.

Para entender mejor el concepto de HMS se presentan a continuación algunas definiciones importantes dadas por Bongaerts [62]:

Holon: Un sistema de manufactura autónomo y cooperativo para fabricar, transportar, almacenar o validar piezas o información. El holon consiste en la información para el

procesamiento de la pieza y en ocasiones la pieza a procesar. Un holon puede ser parte de otro holon.

Autonomía: La capacidad de una entidad para crear y controlar la operación de sus propios planes o estrategias.

Cooperación: Proceso mediante el cual un grupo de entidades realizan la aceptación y ejecución de los planes o estrategias.

Holarquía (Holarchy): Un sistema de Holons que pueden cooperar para alcanzar metas u objetivos. La Holarquía define las reglas básicas de operación de los holons y por lo tanto limita su autonomía.

HMS: es una Holarquía que integra todo el rango de actividades de manufactura desde las órdenes de compra, el diseño, la manufactura, el mercadeo.

Atributos Holonicos: atributos de una entidad que la hacen un Holon. Los atributos mínimos para una entidad son autonomía y cooperación.

Los requisitos prácticos para un HMS son presentados también por Bongaerts [62] que nos permite visualizar la evolución del FMS hacia un HMS. Estos requisitos son:

1ero. Necesidad de implementar sistemas multi - agentes, que proveen al software de decisiones autónomas.

2do. Combinación de la predicción y el alto desempeño así como la robustez y agilidad.

3do. Sistemas reconfigurables que le permitan manejar los cambios de la demanda de forma ágil y a bajo costo.

4to. Los Holons deben asistir al operador en la forma de controlar el sistema. Los holons deberán automáticamente seleccionar los parámetros apropiados y encontrar sus propias estrategias de operación.

5to. El HMS deberá encontrar lugar para el ser humano ya que es el elemento más flexible e inteligente del sistema.

6to. El HMS considerará un enfoque evolutivo que le permita la adaptación y cambios continuos.

El HMS como se presentó en las definiciones es una propuesta de manufactura que utiliza equipos reconfigurables autónomos así como agentes inteligentes que le permiten tomar decisiones frente a condiciones inesperadas tanto internas como externas con el propósito de mantener y lograr las metas de producción y volumen. La flexibilidad en cada uno de los equipos y en el sistema es uno de los primeros factores que se deben considerar previos a la reconfiguración o a la capacidad de trabajar con agentes inteligentes.

1.4.Flexibilidad y su importancia

Maleki [30] define a la flexibilidad como la velocidad en la que un sistema puede reaccionar y ajustarse a los cambios, donde el grado ó nivel de flexibilidad depende del tipo y funcionamiento de los equipos y sistemas utilizados.

Luggen[20] define a la flexibilidad de una manera general y la plantea en cuanto a tres aspectos:³

Flexibilidad por la variedad de mezclas: Combinación de diferentes piezas que el sistema puede hacer al mismo tiempo y los varios subgrupos de tipos de piezas que puede hacer simultáneamente.

Flexibilidad por la adaptabilidad a los cambios de diseño, producción, o ruteo: se refiere a la facilidad de manejar los cambios de ingeniería, a la expansión del universo total de piezas producidas por el sistema, y la variedad de rutas ó máquinas que pueden procesar el mismo tipo de piezas.

Flexibilidad por la versatilidad en máquinas: La facilidad con que una máquina del sistema puede automáticamente pasar de estar maquinando un tipo de pieza a otra diferente.

Askin G. Ronald diferencia entre lo que es flexibilidad y modularidad de un sistema, definiendo a la flexibilidad como la habilidad de manejar productos de diferentes tamaños, formas, pesos, rutas, y volúmenes con el mismo equipo; mientras que la modularidad la define como la habilidad de cambiar el flujo del proceso y la capacidad de producción al aumentar la cantidad de equipos.⁴

Ahora bien, surge la pregunta ¿Cómo determinar si un sistema de manufactura es realmente Flexible?

Una forma es a través de la identificación de la flexibilidad de adaptación y respuesta que se tiene (planteada por Luggen[20]). La flexibilidad de adaptación a las variaciones de volumen, variedad, modificaciones en diseño y la aceptación de nuevas piezas; y la flexibilidad de respuesta a fallas como paro de máquinas o cambios de último minuto en el programa de producción, además de la capacidad de aceptar modificaciones en la configuración y expansiones en el sistema.⁵

Sin embargo, otra forma de saber si un sistema es realmente flexible es a través de la identificación de diferentes características que deben estar presentes en un FMS. Talavage y Hannam[36] plantean que un sistema es flexible si cumple con tres características:

³ LUGGEN W., William. *Flexible Manufacturing Cells and Systems*; New Jersey; Prentice-Hall, Inc., 1991. Pág. 26

⁴ ASKIN G., Ronald. *Modeling and Analysis of Manufacturing Systems*; USA; John Wiley & Sons, Inc., 1993. Pág. 302

⁵ LUGGEN W., William. *Flexible Manufacturing Cells and Systems*; New Jersey; Prentice-Hall, Inc., 1991. Pág. 7

Los medios para la reprogramación de máquinas para el procesamiento de diferentes piezas.

Tener disponible en la máquina toda la herramienta necesaria para maquinar la pieza.

Los medios para el transporte automatizado de las piezas a través de las máquinas además de la carga y descarga automática.

Otra forma similar es la que presenta Greenwood[12] al catalogar a un sistema como flexible o no flexible mediante una serie de preguntas:⁶

¿Qué tan flexible, o inversamente, que tan dedicadas (o especializadas) son las estaciones de trabajo?

¿Qué tan fácil es cambiar las rutas de maquinado de las piezas?

¿Qué tan fácil es alterar el programa de suministro de material al sistema?

¿Qué tan fácil es cambiar los productos que están siendo producidos en el sistema?

¿Qué tan fácil es cambiar el volumen de varios productos que están siendo producidos en el sistema?

Groover[13] considera que para que un FMS sea realmente flexible debe cumplir con cuatro criterios:⁷

- Procesar diferentes estilos de partes, pero no por el modelo de lote.
- Aceptar cambios en el programa de producción.
- Responder en forma inmediata cuando se presenten averías y errores del equipo en el sistema.
- Aceptar la introducción de nuevos diseños de partes.

Las formas de identificación de flexibilidad anteriores proponen un análisis cualitativo de las características presentes en un FMS que permitirán identificarlo como flexible. La flexibilidad de adaptación y respuesta es resultado de un conjunto de características presentes en el sistema; las propuestas de Talavage y Hannam[36], Greenwood[12] y Groover[13] que identifican dichas características se consideran las formas de identificación de flexibilidad específicas que propician la adaptabilidad y respuesta del sistema.

Es importante mencionar también que el grado de control sobre los equipos, tareas y fallas se logra mediante la utilización de equipo sofisticado de control y monitoreo como lo menciona Balaguer [34]: “La flexibilidad se consigue mediante el acoplamiento y sincronización del flujo de datos e información con los medios automatizados de fabricación, transporte y almacenamiento, a través de redes locales LAN (Local Area

⁶ GREENWOOD R. Nigel. *Implementing Flexible Manufacturing Systems*; New York; John Wiley & Sons, 1988. Pág. 19

⁷ GROOVER, P. Mikell. *Fundamentos de Manufactura Moderna; Materiales, Procesos y Sistemas*; 1ra. Edición. México; Pearson Educación, 1996. Pág. 958

Network), que permiten realizar la conexión, vía computadoras, entre los diversos subsistemas”.⁸

Una forma adicional de entender la flexibilidad es presentada por Talavage y Hannam[36]. Ellos plantean que no únicamente con computadoras, máquinas de control numérico interconectadas y sistemas de manejo de materiales automatizado es posible obtener un sistema flexible, es necesario que un FMS se construya alrededor de herramientas flexibles. Esto es debido a que pueden existir equipos para los maquinados y Robots para el suministro de materiales, y hasta una computadora central de control, pero si no se cuentan con las herramientas y equipos como las plantillas (ó utillajes) que tengan la capacidad de sujeción de piezas con variaciones en tamaño, peso, forma, etc., no puede ser considerado un sistema flexible. Una plantilla correctamente diseñada para un FMS proporciona seguridad y precisión en la sujeción de las piezas, una plantilla puede sujetar a la pieza ya sea que este montada en un soporte de mecanización (palet) o no.⁹

Con lo anterior se puede resumir que un FMS es flexible si tiene la capacidad de maquinar piezas de distintas formas, dimensiones y materiales, además de aceptarlas de manera aleatoria, utilizando programas de trabajo coordinados por medio de un software de control y gestión que le indique el tipo de pieza que será maquinada y la ruta de trabajo que ha de seguir. Además, el sistema es capaz de monitorear las áreas de posibles fallas y en caso de presentarse alguna, deberá ser capaz de reorientar el flujo de material a otras máquinas que no presenten problemas. Sin embargo debe entenderse que un FMS no puede fabricar todo tipo de piezas ya que está limitado por las restricciones de su diseño.

1.4.1. Componentes y características en un FMS

La flexibilidad de un FMS tiene relación directa con el tipo de componentes que lo constituyen y de la forma en la que interactúan. Los componentes principales de un FMS son: Estaciones de trabajo (máquinas controladas por computadora), Sistemas de manejo y almacenamiento de materiales, sistemas de control por computadora y personas que operan y dan mantenimiento a los equipos.

Centros de Maquinado (CM) y accesorios: son equipos utilizados para el procesamiento de piezas prismáticas y existen de tipo horizontales (CMH) y verticales (CMV). En un FMS la utilización de un tipo de Centro de Maquinado depende del tipo de pieza, de su tamaño y peso, de la función de la pieza, entre otras, además no es conveniente mezclar los CMH y los CMV ya que habría dificultades en la orientación de las piezas y se tendrían que tener un mayor número de palets y plantillas que eliminaran este problema. Sin embargo, existe una mayor utilización de los CMH en un FMS debido principalmente a la disposición de sus ejes que permite un mayor acceso a los lados de la pieza que ha de ser maquinada. Los CM son máquinas Fresadoras de CNC con equipo automático de cambio de herramientas y equipo para el almacenamiento de palets. Talavege y Hannam[36] afirman que el sistema

⁸ *Sistemas CAD/CAM/CAE; Diseño y Fabricación por Computadora*; México; Publicaciones Marcombo S.A. 1988. Pág. 198

⁹ TALAVAGE, Joseph. Hannam G., Roger. *FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS IN PRACTICE; Applications, Design, and Simulation*; USA; Marcel Dekker, Inc., 1988. Pág. 61

automático de cambio de herramientas (desde 20 a 100 herramientas por carrusel) aumenta la flexibilidad para fabricar una mayor variedad de familias de piezas y mantener al sistema funcionando de manera desasistida por periodos largos de tiempo.

Otro factor importante en este tipo de equipos el número de ejes ya que, como lo menciona Maleki[30]: “Uno de los factores principales que determinan el grado de flexibilidad en una máquina es el relacionado con el número de ejes que esta tenga. Las máquinas en un FMS al menos deben tener como mínimo tres ejes”¹⁰

Los ejes principales en un CM, sea este horizontal o vertical, son el X, Y, y Z, además, existen otros dos ejes adicionales, el eje B y el eje W. El eje B es el que proporciona a la máquina la habilidad de rotar el palet (pallet rotation) que contiene la pieza lo que permite alcanzar otras caras o lados de la pieza. El eje W (Head tilt) soporta al eje B y con movimiento longitudinal acercar la pieza a la herramienta.

Un Palet es un dispositivo que sirve como transportador estándar para las piezas en un FMS; puede o no puede ser parte integrada de un vagón (cart), que es un vehículo utilizado para transportar palets a través de las estaciones.¹¹

Entendemos entonces que el material en un FMS es transportado sobre un palet que a su vez está sobre un vagón que lo lleva a través de las diferentes estaciones.

Las piezas que son procesadas en los centros de maquinado y que normalmente son prismáticas deben estar bien sujetas y firmes antes de que la herramienta inicie el desbaste de material. Una platilla es un dispositivo que puede o no estar montado en un palet y que sujeta a una o varias piezas de tal forma que el acceso a los lados de la misma sea lo más fácil y eficiente posible, es decir, que se puedan realizar maquinados en varias caras de la pieza sin necesidad de reajustar la orientación de la pieza. Las plantillas permiten que la herramienta tenga acceso a la pieza con el simple movimiento de los ejes de la máquina de tal forma que el tiempo para realizar estos movimientos sean mucho menores que el tiempo que se requeriría para reorientar la pieza mediante algún procedimiento de reajuste. “Una platilla es una herramienta para la producción que localiza, sostiene y soporta de manera segura la pieza de trabajo de tal forma que las operaciones de maquinado requeridas puedan llevarse a cabo”.¹²

Centros de Torneado (CT): es la máquina herramienta principal para el procesamiento de piezas rotacionales. Existen dos tipos de CT, los verticales y los horizontales, siendo estos últimos los más utilizados en un FMS y existen de diferentes tipos los cuyas variaciones son en el número de ejes y en su capacidad de manejo y cambio de herramientas. Muchos de los CT cuentan con un diseño tipo cama (slant bed), los cuales tienen montadas en la misma torreta herramientas para desbaste de diámetros exteriores (OD) y diámetros

¹⁰ REZA A., Maleki. *Flexible Manufacturing Systems; The Technology and Management*. New Jersey; Prentice-Hall, Inc., 1991. Pág. 52.

¹¹ RICHARD K., Miller, Terri C., Walker. *FMS/CIM Systems Integration Handbook*, Lilburn, GA; The Fairmont Press, Inc., 1987. Pág.152

¹² HOFFMAN G., Edward. *Jig and Fixture Design*. New York; Delmar Publishers Inc., 1991. Pág. 8

interiores (ID). La cantidad de ejes en un CT puede mejorar el rendimiento de los procesos, como lo menciona Luggen[20], por ejemplo, los equipos con 4 ejes incrementan la productividad en comparación con los equipos convencionales de 2 ejes, ya que las operaciones de OD y ID pueden ser desarrolladas simultáneamente a través de secuencias independientes de programa. Las máquinas con cabezal doble con movimientos independientes pueden lograr altos niveles de productividad.

Los ejes en un CT son los ejes Z, cuyo movimiento es paralelo al cabezal; X, cuyo movimiento es perpendicular al cabezal de la máquina; U y W, los cuales son auxiliares y proporcionan movimientos adicionales y mayor capacidad de herramientas. Los movimientos de la máquina se hace mediante la utilización de la unidad CNC la cual interpreta los códigos de programa y los transforma en señales que activan los motores que mueven los ejes de la máquina.

Robots Industriales: *“Un Robot Industrial es un dispositivo manipulador re-programable y multi-funcional diseñado para mover materiales, piezas, herramientas, o dispositivos especializados mediante movimientos programados variables para el desempeño de una variedad de tareas”*¹³

Los robots pueden ser descritos como servo controlados o no-servo controlados, los últimos son relativamente simples en su control y tienen 4 a 5 grados de libertad los cuales permiten el movimiento de sus articulaciones una por vez. Estos robots normalmente tienen sistemas de actuación neumáticos o hidráulicos y una repetibilidad muy deficiente. Los robots servo controlados tienen sistemas de actuadores eléctricos ó hidráulicos, siendo los primeros los más comunes. Su capacidad para ser programados los hace muy flexibles.

Aunque un robot industrial, por su versatilidad, puede ser utilizado para desempeñar muchas y diversas tareas, en un FMS básicamente el robot es utilizado para:

- a) Carga y descarga de piezas en dispositivos transportadores o palets para la alimentación al FMS.
- b) Carga y descarga de herramientas nuevas o para reemplazo en la torreta de almacenamiento de herramientas de la máquina.
- c) Remoción y limpieza de piezas terminadas.

La Confiabilidad es uno de los más importantes aspectos en un robot y Miller y Walker[31] se refieren a ella de la siguiente manera: la falla de un robot puede significar el paro total de una línea de producción y un elevado costo al parar equipo muy caro y que debe estar funcionando las 24 horas. Existen 3 aspectos que permiten la cuantificación de la Confiabilidad de un robot:

- a) Tiempo medio entre fallas.
- b) Tiempo medio de reparación.
- c) Disponibilidad de Tiempo efectivo (uptime)

¹³ RICHARD K., Miller, Terri C., Walker. *FMS/CIM Systems Integration Handbook*; Lilburn, GA; The Fairmont Press, Inc., 1987. Pág. 55

Esta cuantificación es proporcionada por el fabricante y se pretende mantener un nivel elevado de confiabilidad en este tipo de equipos. Algunas manufactureras de robots ofrecen una confiabilidad del 98%. Actualmente muchos de los Robots manipuladores industriales ofrecen niveles de confiabilidad muy competitivos.¹⁴

Sistemas automáticos de transporte y almacenamiento: En un FMS existe equipo destinado al transporte y almacenamiento de materiales, herramientas ó equipo, el cual tiene la función de suministrar ágil y oportunamente materiales para ser procesados en las máquinas, herramientas para las operaciones de manufactura y otros equipos auxiliares como palets y plantillas. Los sistemas de transporte empleados en un FMS son variados y de diversas capacidades y su utilización dependerá del tipo de productos que sean fabricados en el sistema, de su tamaño peso y configuración, del volumen requerido y del tiempo de ciclo de las máquinas.

Tipo	Naturaleza de carga	Capacidad de carga	Velocidad	Flexibilidad de ruta	Costo	Versatilidad
AGVs	Discreta	Alta	Media	Alta	Muy alto	Alta
Transportadores	Continua	Baja-Media	Baja-Alta	Media	Baja - Alta	Muy Alta
Robots	Discreta	Baja-Media	Media	Baja	Media - Alta	Media
Manual	Discreta	Baja	Baja	Muy Alta	Baja	Muy Alta

Tabla 1.2. Categorías para los sistemas de manejo de materiales. Fuente [12]

Sistemas de control y Comunicación: Como ya se mencionó anteriormente el sistema de comunicación, manejo y control de datos es el que determina el funcionamiento de un FMS ya que a través del control jerárquico de las operaciones, el uso de los datos para la fabricación y equipos altamente automatizados permiten la operación casi desatendida del FMS. El monitoreo continuo de su estado, la retroalimentación de información, la detección de fallas y el cambio de programas para la fabricación son realizados por dispositivos conectados directamente a los actuadores del equipo y cuya información es procesada y enviada para su manejo y almacenaje en sistemas computo.

El control en un FMS es realizado por las computadoras que se encuentran interconectadas mediante redes de comunicación cuya arquitectura depende de las necesidades del sistema y del tipo de equipo utilizado. Dicha arquitectura proporciona niveles de integración ya sea horizontal, vertical ó ambas. En la figura 1.3 y 1.4. se muestra el esquema que representa estos dos tipos de integración en un FMS. Entre los dispositivos más importantes para la integración horizontal de un FMS se encuentran los Controladores Lógicos Programables y los controladores de la célula que son elementos similares a los primeros pero de mayor capacidad.

¹⁴ RICHARD K., Miller, Terri C., Walker. *FMS/CIM Systems Integration Handbook*; Lilburn, GA; The Fairmont Press, Inc., 1987. Pág. 60

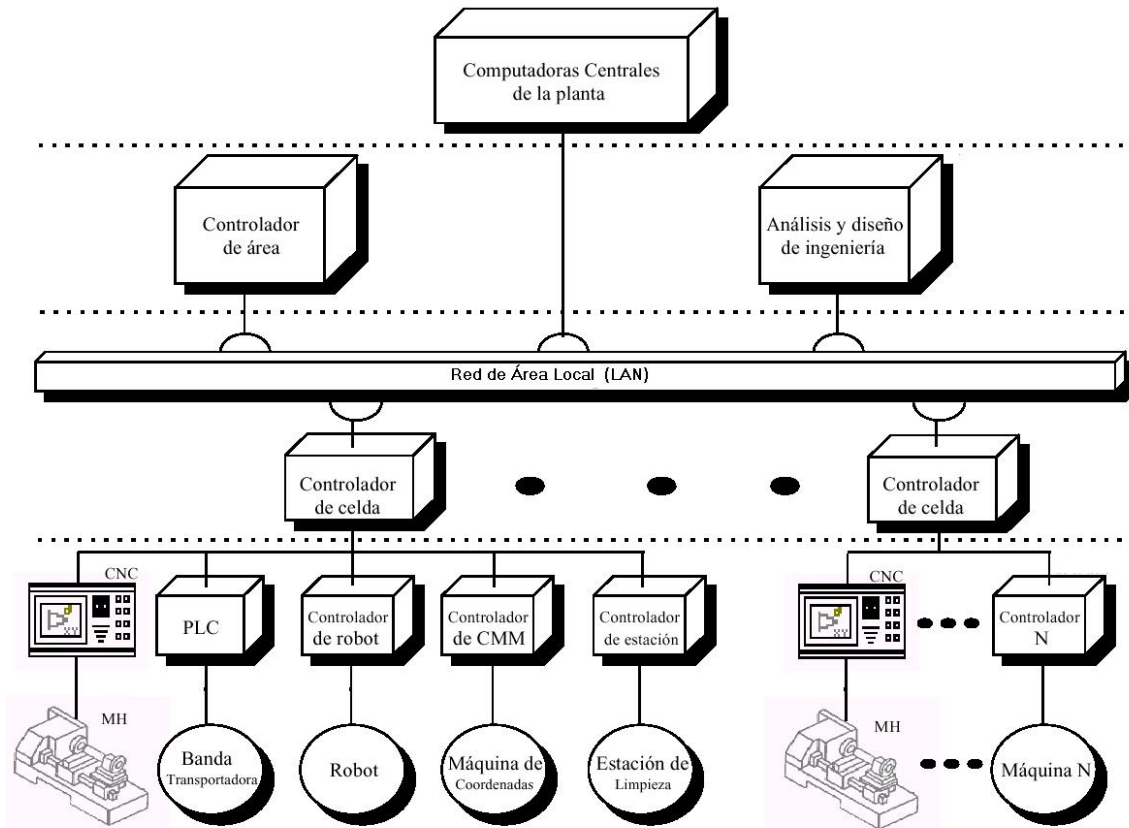


Figura 1.3. Conexiones de la red de comunicación en un FMS típico. Fuente [20]

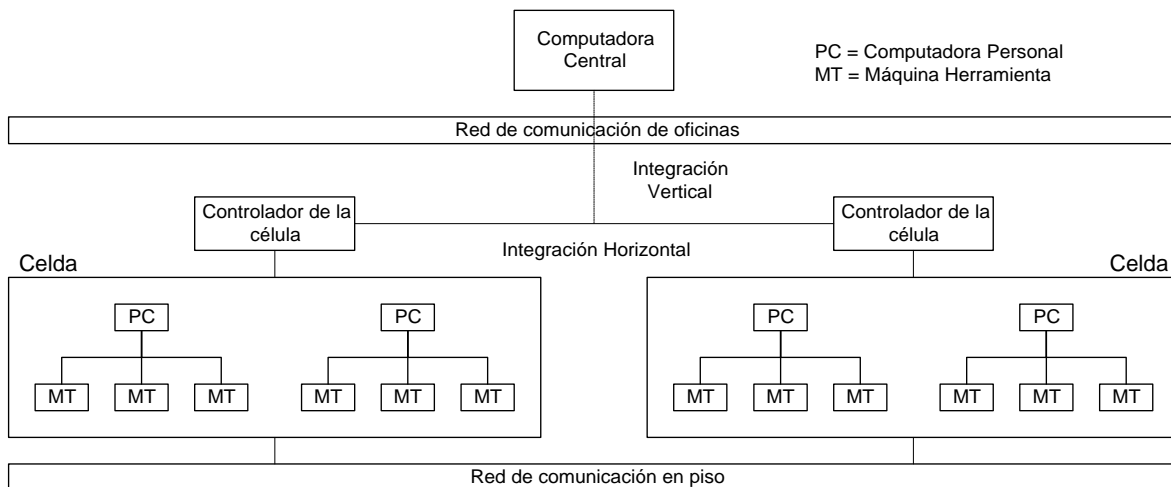


Figura 1.4. Arquitectura del control de una celda de manufactura que muestra la Integración Vertical y la Integración Horizontal en un FMS. Fuente [20]

1.4.2. Tipos de FMS

Los tipos de FMS se catalogan de acuerdo a varios factores, entre ellos en número de máquinas, el tipo de sistema de alimentación, el tipo de sistema de cambio de herramientas y el sistema de manejo de materiales. Chase[2] retoma la clasificación propuesta por Andrew Kusiak (Flexible Manufacturing Systems: A Structural Approach, 1985), en la cual hace la clasificación de los FMS en 5 tipos que se muestran en la siguiente figura.

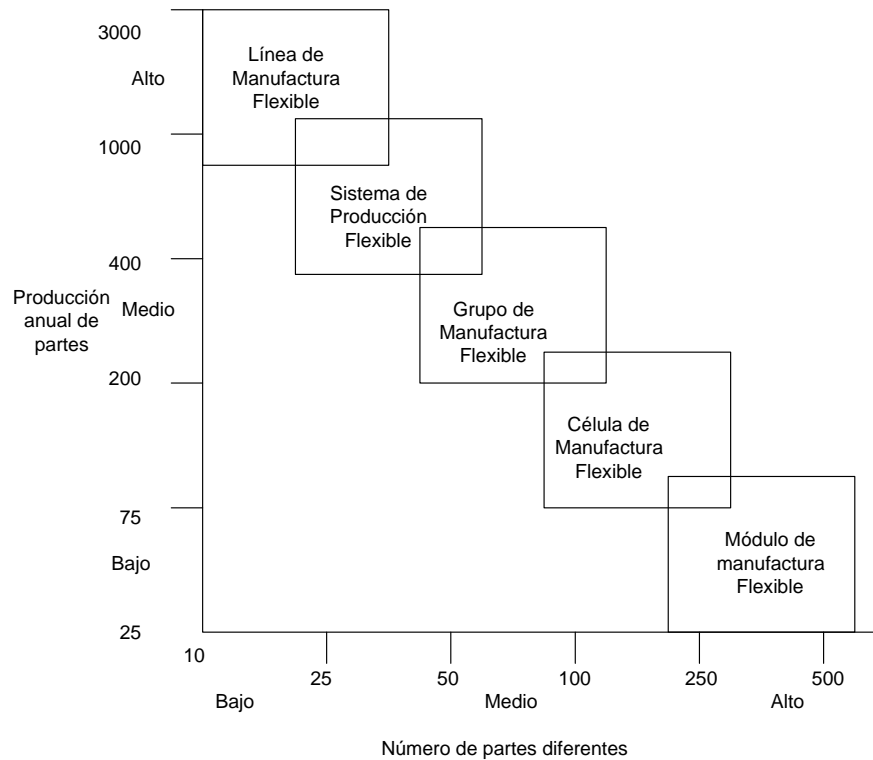


Figura 1.3. Relación entre diferentes tipos de FMS, número de partes diferentes y producción anual de partes. Fuente [2]

Un FMS consiste en varios sistemas interconectados entre sí, y los principales son el sistema técnico, el sistema de operación humana y el sistema de información. En la figura 1.4. se muestra el esquema de dichos subsistemas, sus componentes y su interrelación. El sistema de procesamiento está constituido por las máquinas, los sistemas de almacenamiento local de herramientas y los sistemas de cambio local de herramientas, además de las estaciones de control de calidad y las máquinas para la limpieza de las piezas terminadas. En la figura 1.5. se muestran estos componentes. El sistema de suministro de materiales está constituido por el sistema de transporte, el sistema de almacenamiento, el sistema de manejo y el sistema de preparación. La diferencia entre el sistema de transporte y el sistema de manejo es que el primero se encarga del transporte de las piezas por todo el sistema, y el segundo se encarga de la orientación final de las piezas para ser maquinadas en alguna de las máquinas. El sistema de preparación se refiere a las operaciones de

sujeción de las piezas en los palets y plantillas antes de que las operaciones de maquinado se lleven a cabo. En la figura 1.6. se muestran estos componentes.

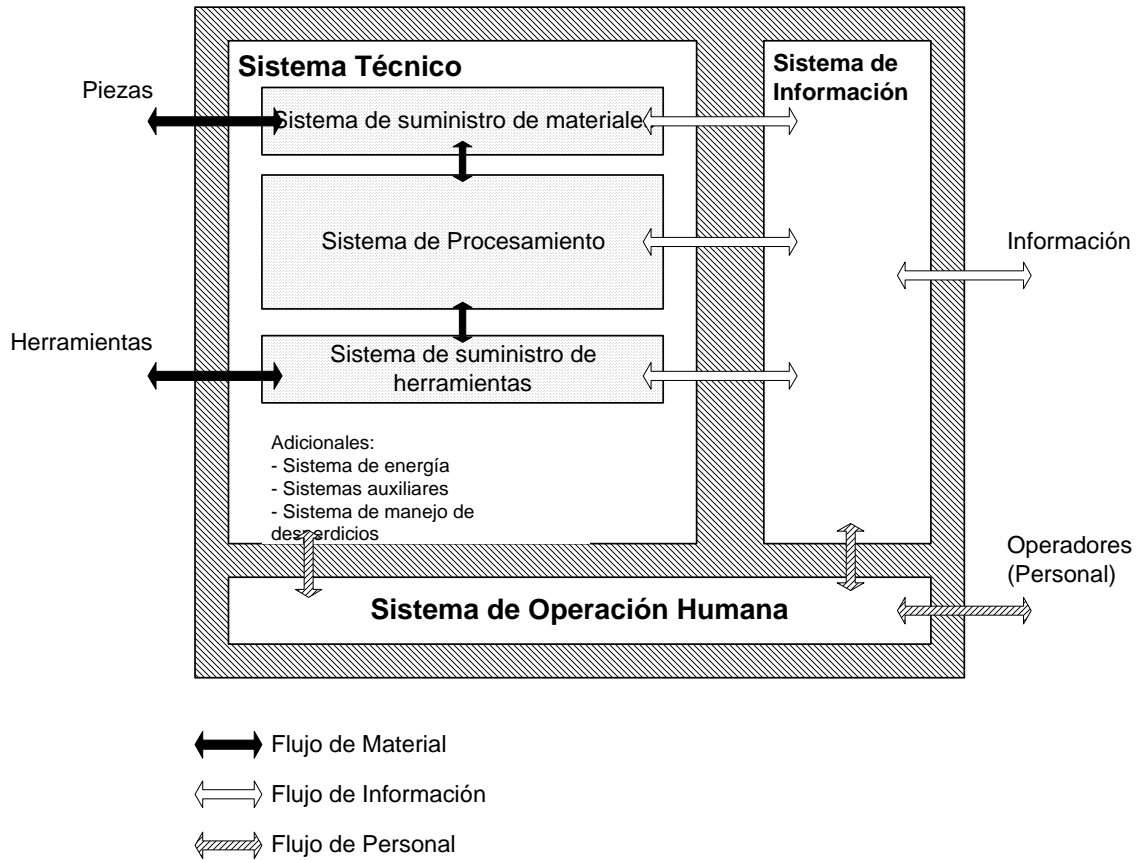


Figura 1.4. Subsistemas de un FMS. Fuente [37]

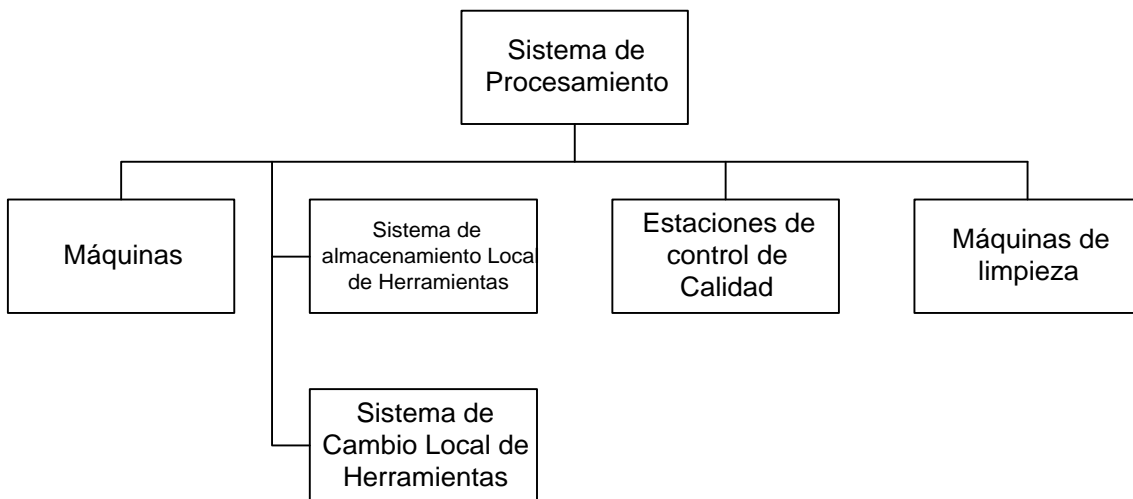


Figura 1.5. Componentes del sistema de procesamiento del FMS. Fuente[37]

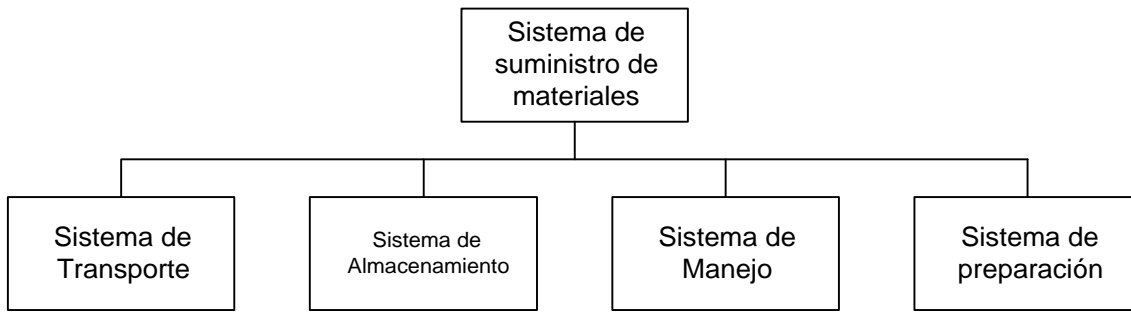


Figura 1.6. Componentes del sistema de suministro de materiales. Fuente [37]

El sistema de manejo de materiales en un FMS determina su arreglo o LayOut y en la actualidad se pueden encontrar 5 tipos de configuraciones que se muestran en las figuras 1.7 a la 1.10. Las configuraciones y sistemas de transporte normalmente utilizados en el FMS son según Groover[41] son:

Tipo de Configuración	Sistema de Manejo de Materiales
Layout en Línea	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de bandas transportadoras en línea - Bandas transportadoras - Sistema de vehículos guiados por rieles
Layout cerrado	<ul style="list-style-type: none"> - Bandas transportadoras - Remolques guiados por cables
Layout en escalera	<ul style="list-style-type: none"> - Bandas transportadoras - Vehículos Guiados Automáticamente (AGV) - Sistema de vehículos guiados por rieles
Layout de campo abierto	<ul style="list-style-type: none"> - AGVs - Remolques guiados por cables
Layout con robot al centro	<ul style="list-style-type: none"> - Robots Industriales

La coordinación de actividades en cualquiera de las configuraciones del FMS se lleva a cabo por la red de computadoras de control cuyas funciones principales son:

- a. Control de estaciones
- b. Control de la producción
- c. Control de tráfico
- d. Control de vagones, carros o remolques
- e. Monitoreo de piezas
- f. Control de Herramientas
- g. Monitoreo y reporte de desempeño
- h. Diagnóstico de estado y fallas.

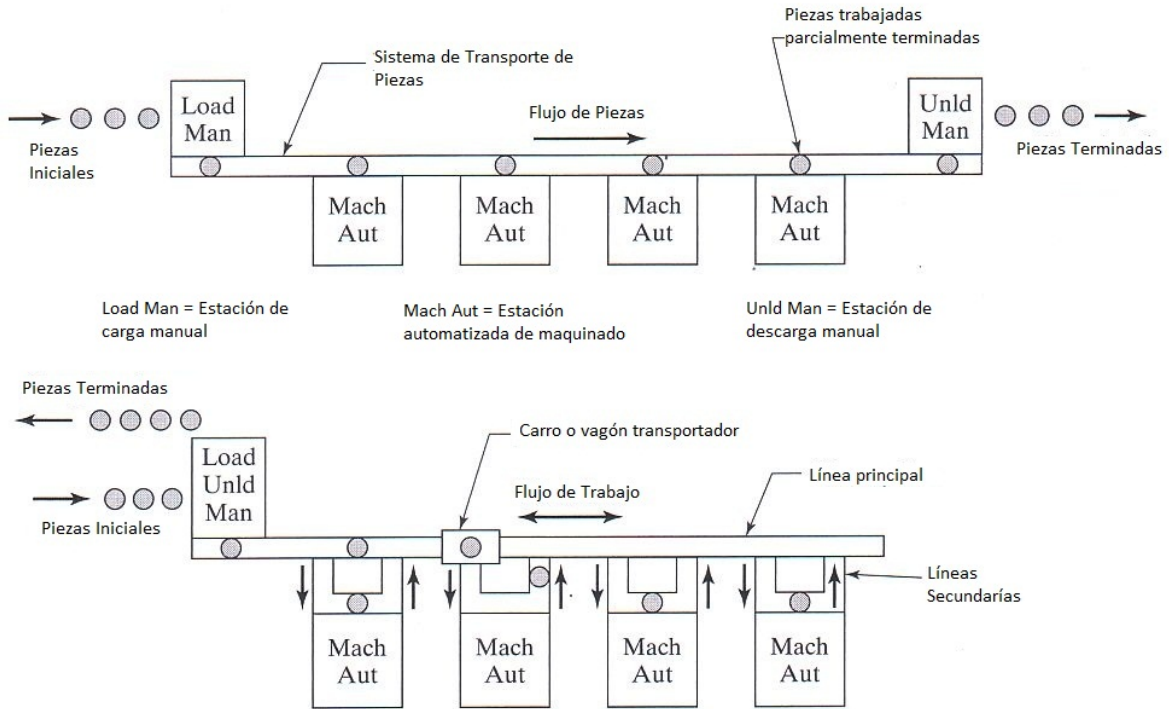


Figura 1.7. Configuración de un FMS con Layout en Línea. Fuente [41]

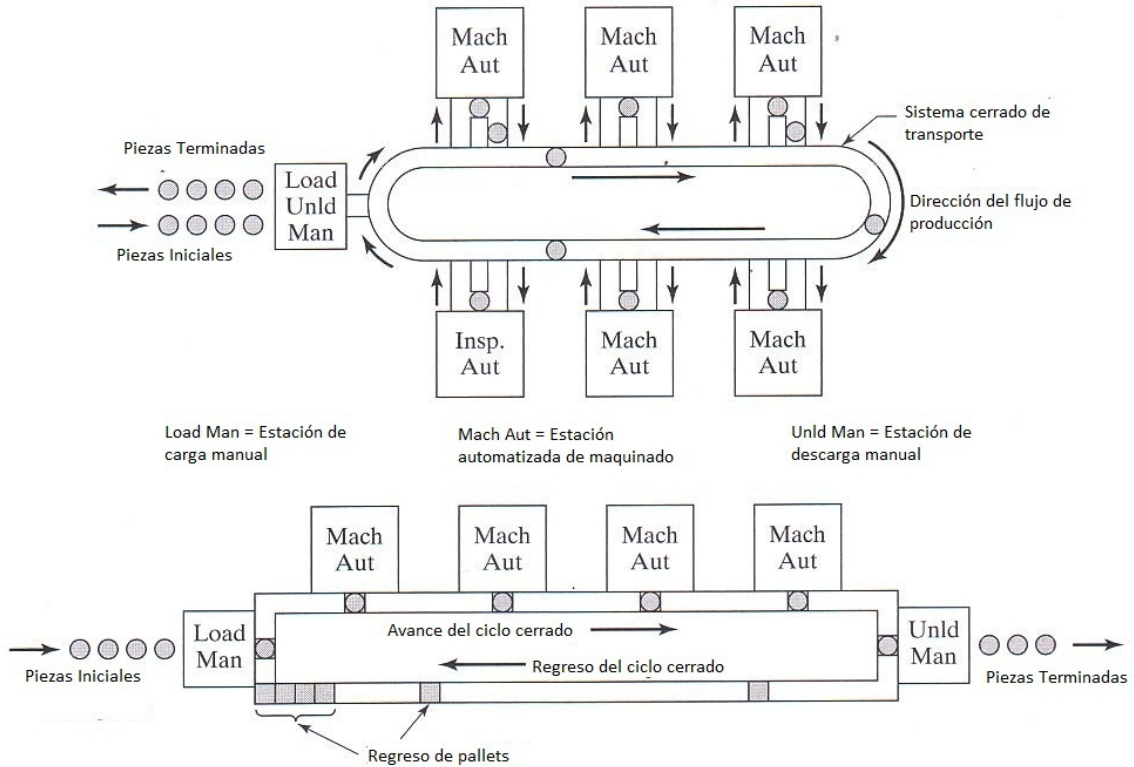


Figura 1.8. Configuración de un FMS con Layout cerrado. Fuente [41]

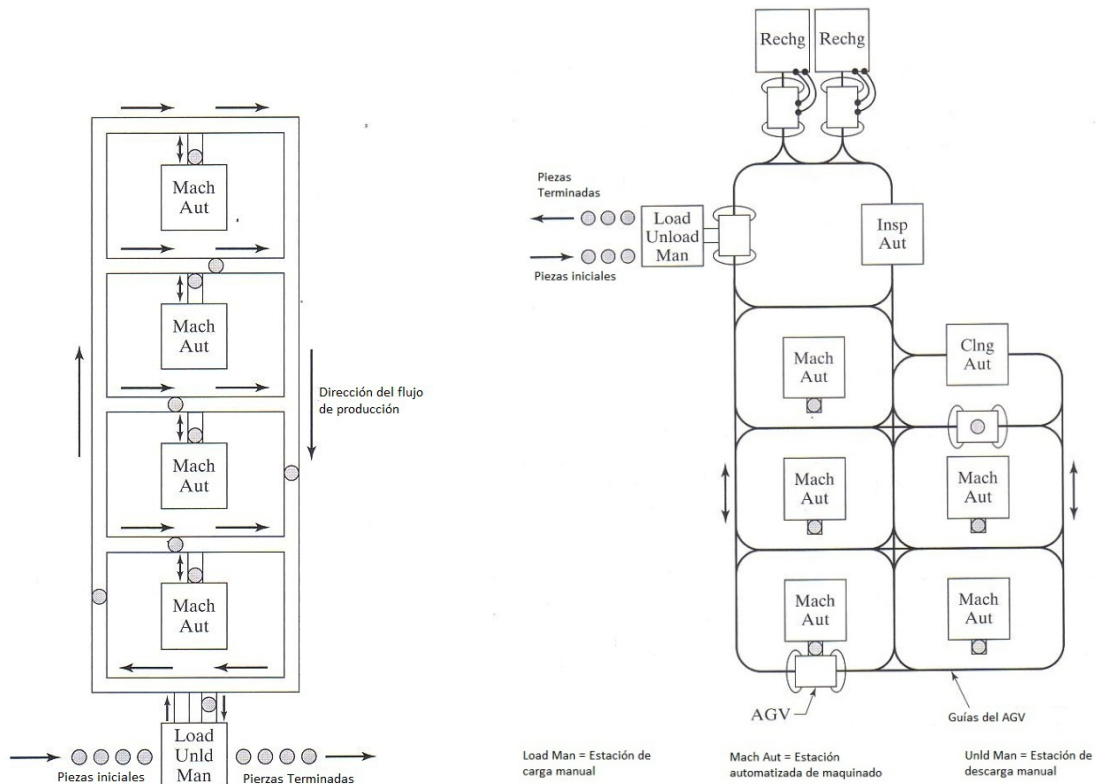


Figura 1.9. Configuración de un FMS con Layout en escalera y Layout de campo abierto.
Fuente [41]

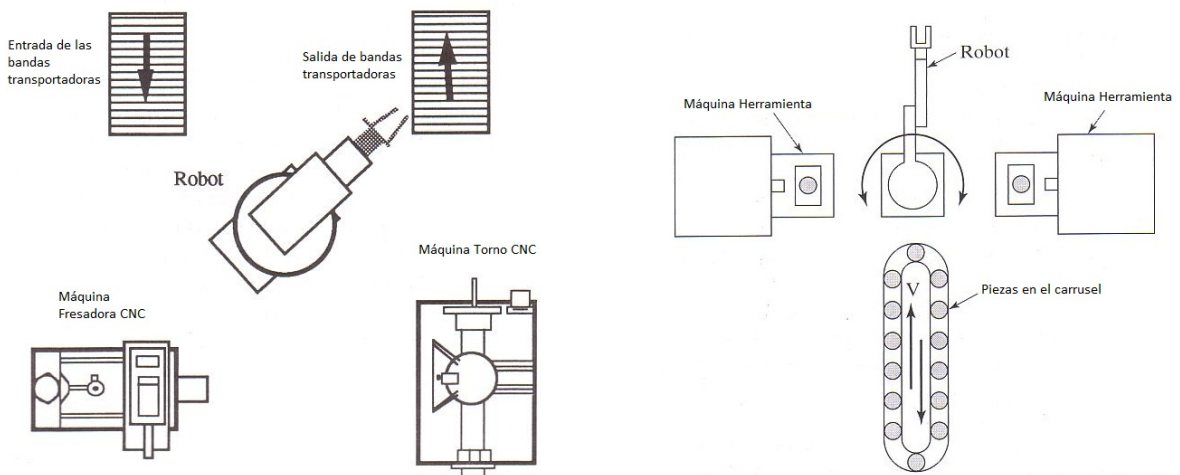


Figura 1.10. Configuración de un FMS con Layout con Robot al centro. Fuente [41]

1.4.3. Formas de medir la flexibilidad

Las formas de flexibilidad son propuestas hechas por varios autores y permitirán ubicar a un FMS en un estado de flexibilidad con respecto a otro, con el propósito de establecer las principales características de flexibilidad de un FMS.

Hungh, Jack (Automated Manufacturing, Engineer on a disk, 1999) presenta sus formas de flexibilidad:

- Manejo capaz de una mezcla de piezas en poco o gran volumen.
- Variaciones permitidas en la mezcla de piezas.
- Flexibilidad en el ruteo para alternar entre máquinas.
- Flexibilidad en volumen.
- Flexibilidad en el cambio de diseño.

El autor propone estas 5 formas de flexibilidad que son indicadores que pretenden describir la capacidad del FMS para adaptarse y reaccionar al medio y hacen referencia al tipo y volumen de piezas, así como al sistema de manejo de materiales, pero como se puede notar se omiten otras características importantes del sistema como son el tipo de máquinas, los sistemas de control, etc., además de que no se presenta una identificación clara de los elementos involucrados en el logro de dichas formas de flexibilidad; por lo tanto será necesario adoptar otra forma de determinar la flexibilidad. Las formas de flexibilidad que en este trabajo se consideran como las más apropiadas son las presentadas por Tidd [38] y mejor abordadas por Tempelmeier y Juhn [37]; estas formas de flexibilidad serán las utilizadas para la determinación del estado de flexibilidad del FMS en estudio.

A continuación se describen estas formas de flexibilidad:¹⁵

1. Flexibilidad de Máquinas

La flexibilidad de máquinas describe la facilidad, con que una máquina puede ser llevada de una operación a otra. En un Centro de Maquinado esto se logra, por ejemplo, a través de un cambio automatizado de herramientas. La flexibilidad de máquinas es una cualidad de la máquina y está determinada por las dimensiones del tamaño de la torreta porta herramientas.

Ferré[23] describe a la flexibilidad de máquinas según la función no solo de la herramienta sino también de la pieza de trabajo y lo hace de la siguiente manera:¹⁶

Función Herramienta.

Cambio automático de la herramienta en el portaherramientas de la máquina de acuerdo con la operación a efectuar.

Comprobación del nivel de desgaste de la herramienta para corrección de la compensación si procede y para reposición de la misma por rotura o desgaste límite.

¹⁵ TEMPELMEIER, Horst. Kuhn, Heinrich. *Flexible Manufacturing Systems, Decision Support for Design and Operation*; New York, John Wiley & Sons, Inc., 1993. Pág. 16

¹⁶ MASIP Ferré, Rafael. *La Fábrica Flexible*; Barcelona; Marcombo, S.A., 1988. Pág. 58

Almacén de stock de herramienta adosado a la máquina junto con los elementos de fijación necesarios, pinzas, conos, separadores, etc.

Sistemas de identificación de tipo de herramienta.

Función Pieza.

El cambio automático de piezas.

El almacenamiento a pie de la máquina.

La medición en máquina.

La identificación de piezas.

2. Flexibilidad del Manejo de Materiales

La flexibilidad del Manejo de Materiales es la habilidad del sistema de manejo de materiales del FMS de transportar y de ubicar a las piezas que pueden ser de diferentes tipos y tamaños. Un sistema de manejo de materiales que transporte el material de manera eficaz y eficientemente a las áreas donde se les requiera tendrá mayor flexibilidad en relación con un sistema que esté limitado en el tipo y tamaño de las piezas que puede transportar así como limitaciones en las rutas a las que debe tener acceso. Entre mayor sea la flexibilidad del Manejo de Materiales el suministro de material a las máquinas es mejor, así la flexibilidad de las máquinas no es impedida por los límites del sistema de manejo de materiales.

La flexibilidad del Manejo de Materiales es una cualidad del sistema de manejo de materiales y está influenciado por el diseño técnico del sistema y por las rutas de transporte en la planta.

3. Flexibilidad de operación

La flexibilidad de operación existe para una pieza si esta puede ser procesada con diferentes secuencias de operaciones tecnológicas (planes de proceso). Entre mayor sea la flexibilidad de operación de la pieza, mejor será el balance de la carga de trabajo de las máquinas, esto incrementará el volumen potencial de producción del FMS. La flexibilidad de operación es una cualidad de la pieza y esta se determina a través de la generación de diferentes planes de proceso para una sola pieza.

“Estas tres primeras formas de flexibilidad describen las propiedades de las máquinas, del sistema de manejo de materiales y del tipo de piezas que serán procesadas en el sistema. Cada una de éstas formas de flexibilidad involucra únicamente a un solo elemento del FMS. A la vez, las otras formas de flexibilidad restantes involucran simultáneamente a varios elementos.”¹⁷

4. Flexibilidad de expansión

La flexibilidad de expansión se refiere a: En qué cantidad, y si es posible o no, un FMS puede expandirse a través del incremento ó disminución del número de máquinas, estaciones, etc. La expansión es necesaria cuando si, por ejemplo, debido a los cambios en los requerimientos de producción, un grupo de máquinas idénticas se vuelve un cuello de botella y es necesario incrementar su número ó si un nuevo tipo de pieza tiene que ser procesada en el FMS y por consiguiente requiera operaciones que no pueden ejecutarse con

¹⁷ TEMPELMEIER, Horst. Kuhn, Heinrich. *Flexible Manufacturing Systems, Decision Support for Design and Operation*; New York, John Wiley & Sons, Inc., 1993. Pag. 16

las máquinas disponibles en el sistema. Otro concepto muy parecido a este es el de Flexibilidad de reconstrucción, en donde los componentes son intercambiados ó reubicados para adaptar al sistema a los nuevos requerimientos de producción. En este trabajo, esta forma de flexibilidad no es considerada para la evaluación.

La flexibilidad de expansión es un atributo de todo el sistema. Puede lograrse desde el principio de la distribución de planta (al dejar espacio suficiente para la introducción futura de nuevos equipos) y mediante conceptos de modularidad del hardware y software, es decir, su capacidad para trabajar de manera independiente y también de manera integral para lograr el intercambio y retroalimentación de información.

5. Flexibilidad de producción

Si en lugar de expandir el FMS se cambia su configuración, entonces el término de flexibilidad de producción se vuelve relevante. La flexibilidad de producción se refiere a un grupo de productos que pueden ser procesados por el FMS sin ningún otro tipo de inversión. La flexibilidad de producción es una capacidad de todos el FMS. Se ve determinada por la tecnología de las máquinas y el grado en que estas son idénticas o complementarias. Se dice que un FMS con máquinas complementarias tienen una flexibilidad de producción mayor que un FMS con máquinas idénticas.

6. Flexibilidad de Proceso

La flexibilidad de proceso excluye a la flexibilidad de expansión o una nueva configuración del sistema. Se refiere a la cantidad de familias de piezas diferentes que pueden ser procesadas en el FMS sin necesidad de hacer cambios mayores en su configuración. Entre más grande sea este grupo de piezas menor será el inventario requerido para asegurar un cierto tiempo de entrega para el cliente, porque todas las piezas pueden ser procesadas sin necesidad de hacer cambios en la configuración del sistema.

7. Flexibilidad de Ruta

A diferencia de la Flexibilidad de operación que se refiere directamente a los planes de proceso de la pieza y sus planes alternativos, la flexibilidad de ruta se aplica cuando una pieza con un plan de proceso dado puede seguir diferentes rutas a través del FMS. Esto sucede cuando varias máquinas idénticas pueden ser usadas alternamente para desempeñar las operaciones. Es especialmente importante cuando existen paros de máquinas. Es entonces cuando los planes alternativos de la pieza son quienes determinan la nueva ruta de trabajo a través de las máquinas y mediante el sistema de suministro de herramientas.

La flexibilidad de ruta es una propiedad de las máquinas del FMS. Depende en particular del número de máquinas idénticas y en que tan rápido son suministradas las herramientas requeridas. Es evidente que el sistema de manejo de materiales debe tener acceso a todas aquellas máquinas y equipos que se hayan determinado rutas alternativas para las piezas, de lo contrario la pieza no tendría rutas alternativas para su procesamiento disminuyendo o eliminando la flexibilidad de ruta.

8. Flexibilidad de Volumen

La flexibilidad de volumen describe la habilidad del FMS para trabajar económicamente a diferentes niveles de producción. Un FMS con una alta flexibilidad de volumen muestra

una curva suave de costo por pieza. La flexibilidad de volumen es una propiedad de todo el sistema.

Las formas de flexibilidad anteriores se encuentran presentes en un FMS y determinan su comportamiento y desempeño. Aunque no se han establecido medidas cuantitativas para determinar la flexibilidad de un FMS, las formas anteriores, de carácter cualitativo, son la base para determinar el estado de flexibilidad del FMS en estudio en este trabajo de investigación.

Por último podemos decir que las características de los componentes de un FMS son determinantes de la flexibilidad de todo el sistema, tanto las máquinas de control numérico, los sistemas de transporte, los sistemas de inspección y los de control, las herramientas, plantillas, etc. Los componentes del FMS y sus características serán tratados más adelante en este capítulo. Otros elementos no tangibles del FMS también son determinantes de la flexibilidad, uno de ellos es la Tecnología de Grupos (GT, por Group Technology) tal como lo menciona Maleki[30]:

“En los Sistemas Flexibles de Manufactura se procesan familias de partes o grupos de partes con características similares. Esto es importante para la flexibilidad. Como consecuencia, la implementación de la tecnología de grupos se convierte en una parte significativa del sistema”¹⁸; lo que se considera una parte importante en la determinación de la flexibilidad del FMS.

Como se mencionó, unas formas de flexibilidad son dependientes de los ciertos componentes del FMS mientras otras lo son de todo el sistema. Estos componentes y la forma en que interactúan con todo el sistema para lograr un estado de flexibilidad se logra en conjunto con el estado de integración que guarda el FMS y que define su operación y desempeño.

1.5. Tipo de fallas en un FMS

Una falla en el sistema se manifiesta cuando se deja de proveer un servicio o actividad ya sea de producción, de transporte, de monitoreo o control. Un sistema es tolerante a fallas si continúa proveyendo los servicios especificados aún en presencia de fallas de hardware o errores de software.

La detección de fallas se encarga de la recuperación del sistema como por ejemplo en caso de daños mayores a las herramientas, a la detección de fallas generales, o al rompimiento de herramientas. La detección de fallas normalmente es hecha por un sistema para el control y medición del torque y otro sistema de sensores para detectar el rompimiento de la herramienta. En la figura 1.11. se muestra un esquema utilizado para la detección de fallas.

¹⁸ REZA A., Maleki. *Flexible Manufacturing Systems; The Technology and Management*. New Jersey; Prentice-Hall, Inc., 1991. Pág. 153

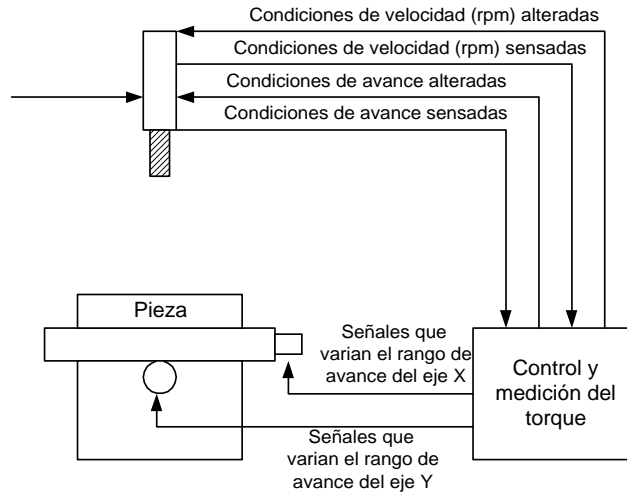


Figura 1.11. Sistema de detección de fallas mediante sensores y sistemas de control y medición de torque. Fuente [20]

Estos dos sistemas permiten que en caso de choques, desgaste o rompimiento, el proceso de manufactura sea detenido momentáneamente mientras se da aviso a los sistemas o personal encargado del mantenimiento para el restablecimiento del estado normal de operación.

Una falla sucede debido a un defecto en el hardware o software o a condiciones externas que llevan a la manifestación de la falla que puede convertirse en una avería en dispositivos, en equipo o en el sistema.

1.5.1. Fallas Duras

Las fallas en un FMS son muchas y dependen del tipo de dispositivos, el nivel de automatización, el volumen y variedad de producción, etc., pero aquellas que hacen que el componente deje de funcionar se les conoce como Fallas Duras. Un ejemplo sería el rompimiento de una herramienta de una máquina CNC que detendrá su operación mediante el sistema de detección de fallas, o la falla mecánica, o eléctrica en un robot articulado que detendrá su operación. Una avería ó falla de éste tipo requerirá de procedimientos de mantenimiento y recalibración de condiciones de producción, lo que consumirá tiempo y recursos así como desincronización de operaciones hasta la finalización del periodo transitorio del sistema.

1.5.2. Fallas Suaves

Éste tipo de fallas ocurren durante la operación del sistema y son condiciones que no detienen el funcionamiento de un dispositivo o equipo ya que la repercusión del daño es tolerado por la misma estructura o diseño del componente. Sin embargo la repetición de ésta falla puede derivarse en una falla dura. Un ejemplo de ésta falla sería la continua acumulación de residuos en un cilindro neumático que disminuye la velocidad y opone resistencia al movimiento lo que llevará a la falla dura.

Capítulo 2

Métodos de Análisis de Sistemas
Flexibles de Manufactura

2.1. Grafos de estado

Un evento está estrechamente relacionado con las condiciones en las cuales sucede. Por ejemplo, en un sistema de ensamble robótico, un brazo robot deberá estar listo para tomar un componente y un componente deberá estar listo para ser tomado antes de que el evento “tomar” ó “inicio de la operación tomar” ocurra. Una vez que el evento ocurre, un nuevo estado se obtiene como resultado. Después del evento “tomar”, el brazo robot debe sostener el componente si la operación tomar fue exitosa, de lo contrario esperará por instrucciones ó se realizará otro intento. Un mecanismo muy simple para describir la relación entre condiciones y eventos es un diagrama de estado-transición ó estado de máquina finito. En éste, todas las condiciones de los componentes en un sistema en un instante de tiempo representan el estado del sistema. La ocurrencia de un evento en un estado puede cambiar el estado del sistema a otro para representar el evento. En un diagrama de estado se usa un círculo para representar un estado y se usa un arco que va de un estado a otro para representar un evento. Un arco en el diagrama es llamado transición, y un círculo es llamado nodo. Es fácil construir el modelo del estado de una máquina especialmente cuando solo uno u unos cuantos recursos están involucrados. En la figura 2.1. se muestra el diagrama del ejemplo del brazo robot ejecutando una tarea de insertar la pieza.

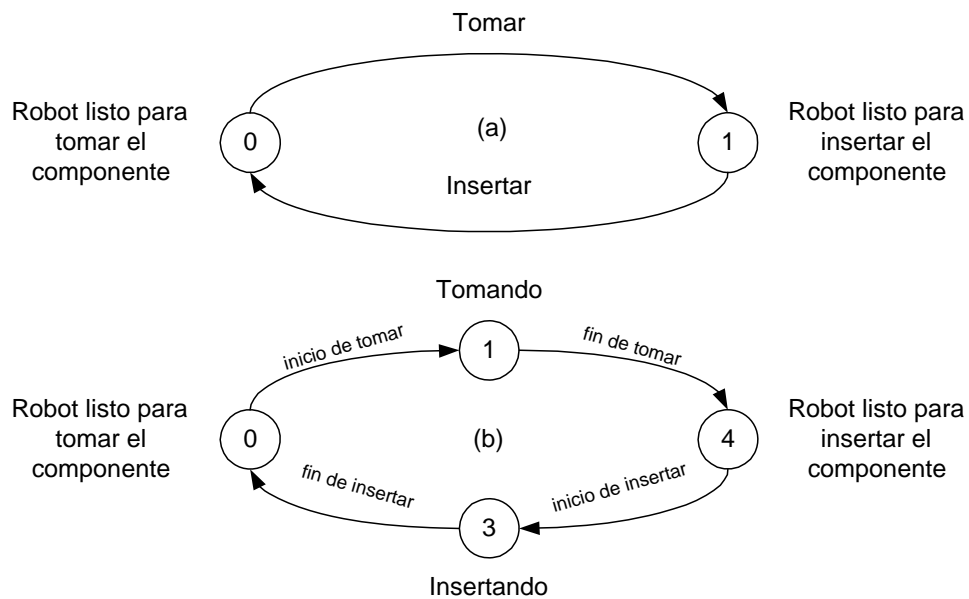


Figura 2.1. Sistema de ensamble robótico (a) Dos estados dos eventos, (b) Cuatro estados cuatro eventos.

Si al modelo se incluye un segundo sistema de ensamble robótico el número de eventos del sistema es la suma de los eventos de cada recurso de manera individual si asumimos que solo uno de ellos ocurre en un instante determinado de tiempo. Es decir, el número de eventos se incrementa de forma lineal. El número de estados, sin embargo, crece de forma exponencial con el número de estados de cada recurso en el modelo. Esto se ejemplifica en la figura 2.2.

En la figura se han omitido los eventos que ocasionarían una colisión entre los brazos robots, ya que no es posible que ambos realicen la operación de insertar al mismo tiempo. Cuando se consideran los eventos fin e inicio (figuras 2.2.(b) y 2.2.(b)) la representación se hace más compleja ya que el número de eventos es mayor aún considerando las restricciones. Resulta tedioso realizar un diagrama de estado de máquina ya que se debe definir el estado global del sistema, y después enumerar todos los estados y eventos posibles de cada estado. Lo que llevaría a un gran número de estados para un sistema complejo como son los FMS.

Una formulación que pueda superar las limitaciones del modelado de estado de máquina es necesario para el manejo de sistemas complejos. Esta formulación debe representar al mismo tiempo condiciones y eventos, relaciones de precedencia, situaciones de conflicto, conceptos de sincronización, operaciones concurrentes, y la exclusión mutua de relaciones. La invención de las PN por Carl A. Petri en su disertación doctoral de 1962 identifico y solucionó dicha demanda.

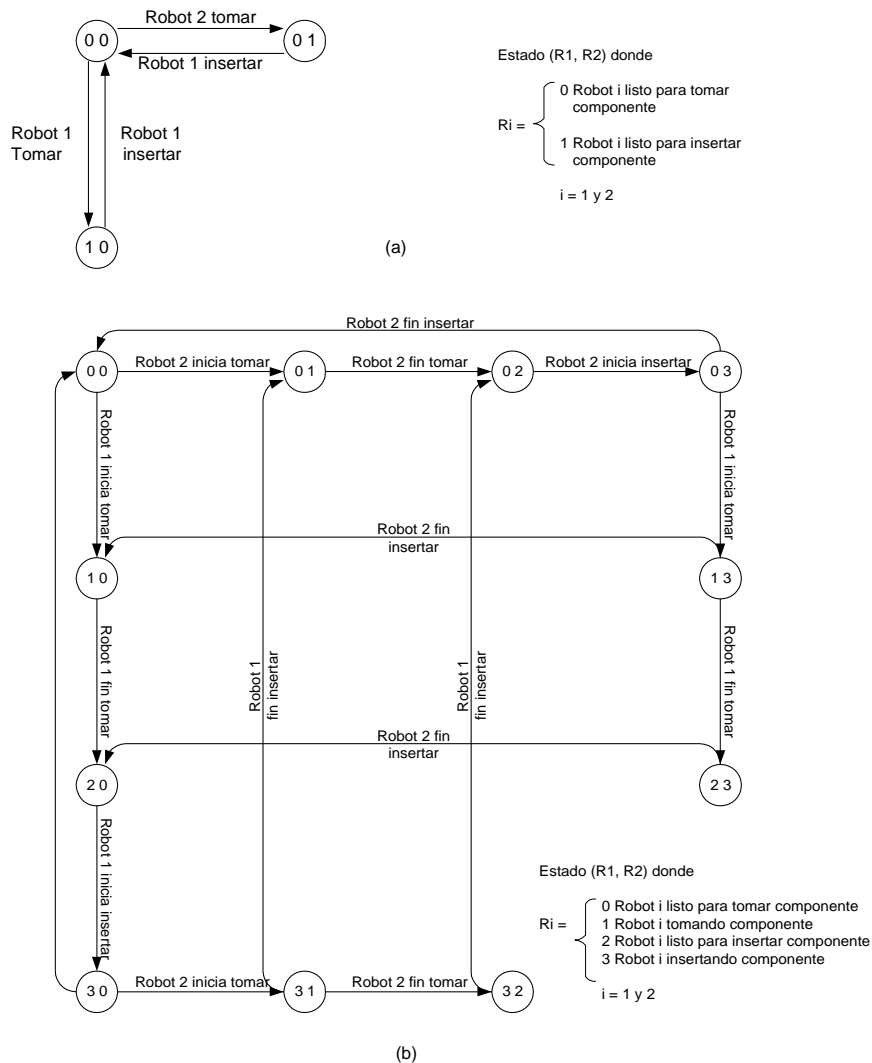


Figura 2.2. Modelos de estado para un sistema con dos brazos robots para ensamble. (a) 3 estados 4 eventos, (b) 11 estados 16 eventos.

2.2. Redes de Petri

Una Petri Net consiste en posiciones (**places**) y transiciones (**transitions**) que están unidas por arcos (**arcs**) que van de las posiciones hacia las transiciones (arcos de entrada, **input arcs**), y otros que van de las transiciones hacia las posiciones (arcos de salida, **output arcs**). Entonces, una Petri Net puede ser descrita como un grafico bi direccional cuyos nodos son un grupo de posiciones y un grupo de transiciones.

A continuación se describen con más detalle los componentes de una PN:

- Las posiciones representan los componentes pasivos del sistema que almacenan una ó más marcas (tokens) para representar estados particulares. Gráficamente, las posiciones son representadas por círculos y los token se representan con puntos.
- Las transiciones representan los componentes activos del sistema que pueden producir, transportar o consumir tokens. Para cada transición hay un grupo de posiciones de entrada y un grupo de posiciones de salida. Gráficamente las transiciones se representan con rectángulos.
- Los arcos conectan a las posiciones con las transiciones y representan las relaciones entre ellos. La dirección del arco indica el flujo de información (token flow) a través de la red: de una posición de entrada a una transición ó de una transición a una posición de salida. Los arcos tienen un “peso” que indica el número de tokens que son transferidos de una posición de entrada a una transición ó de una transición a una posición de salida. Un segmento de línea que cruza sobre un arco ó la indicación de su peso es la representación gráfica del mismo.

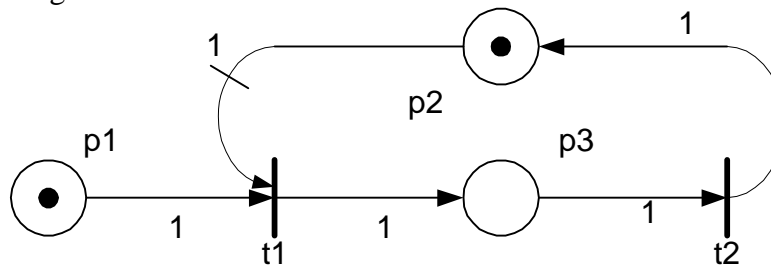


Figura 2.3. Representación gráfica de una PN. 3 posiciones, 2 transiciones

Una transición está disponible(ó puede ser disparada, FIRE) si en cada uno de las posiciones de entrada que llegan a ella hay un número de tokens mayor ó igual al peso del arco correspondiente que los une a ella. Cuando esto ocurre, la transición transfiere un número de tokens, igual al peso del arco correspondiente, de cada posición de entrada y suma el número de tokens, igual al peso del arco correspondiente, a cada posición de salida. La marcación (Marking) o estado de la PN es la posición de las tokens en la red en cualquier instante de tiempo. Una marcación dada de un PN define que transición está disponible para ser “disparada”. El disparo de una transición ubica a la red en una nueva marcación ó estado. Una marcación m' se dice que es alcanzable (reachable) desde una marcación m si hay una secuencia de marcaciones intermedias (y transiciones) que conducen a m hacia m' . El grupo de todas aquellas marcaciones que se obtienen desde m se le conoce como grupo permisible (reachability set) y puede ser representado en una gráfica

de alcanzabilidad (reachability graph) que se presentará más adelante. En la figura 2.4. se muestran las condiciones anteriores al dispararse la transición.

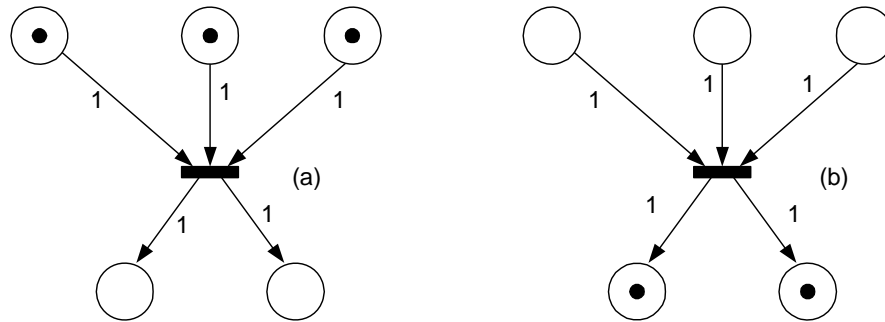


Figura 2.4. (a) Estado inicial de la PN, marcación m ; (b) Nuevo estado de la PN, marcación m' .

Las posiciones y las transiciones son dos tipos de nodos que no pueden ser unidos entre sí, es decir, una posición no puede ser unida a otra mediante un arco, ni una transición puede ser unida a otra mediante un arco.

La descripción formal ó de estructura de una PN es:

- Una PN $Z = (P, T, I, O, m)$ donde
 - o $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $n > 0$, es un grupo finito de posiciones (**places**) representadas por círculos;
 - o $T = \{t_1, t_2, \dots, t_s\}$, $s > 0$, es un grupo finito de transiciones (**transitions**) representadas por barras, donde $P \cup T \neq \emptyset$ y $P \cap T = \emptyset$;
 - o $I: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$, es una función de entradas que define el grupo de arcos directos desde P a T donde $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, \dots\}$;
 - o $O: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$, es una función de salidas que define el grupo de arcos directos desde T a P ;
 - o $M: P \rightarrow \mathbb{N}$, es la marcación (**marked**) cuyos i^{th} componentes representan el número de marcas (**tokens**) en la posición i^{th} . La marcación inicial se representa por m_0 . Las marcas son representadas por puntos (\bullet).

La introducción de tokens en las posiciones y su flujo a través de las transiciones permiten describir y estudiar el comportamiento dinámico de eventos discretos de la PN. La definición anterior también es conocida como PN ordinaria (*ordinary Petri Net*). El conjunto de los arcos I y O representan dos matrices de enteros no negativos $n \times s$. La substracción de I con O resulta en una matriz de incidencia representada por: $C = O - I$

Con lo anterior, la descripción de la figura 2.20. se especifica de la siguiente manera:

$$P = \{p_1, p_2, p_3\}$$

$$T = \{t_1, t_2\}$$

$I(p_1, t_1) = 1, I(p_1, t_2) = 0; O(p_1, t_1) = 0, O(p_1, t_2) = 0;$
 $I(p_2, t_1) = 1, I(p_2, t_2) = 0; O(p_2, t_1) = 0, O(p_2, t_2) = 1;$
 $I(p_3, t_1) = 0, I(p_3, t_2) = 1; O(p_3, t_1) = 1, O(p_3, t_2) = 0;$

$$m = (1 \ 1 \ 0)^T$$

Las funciones de entrada y salida pueden ser representadas como matrices:

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ y } O = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Y la matriz de incidencia $C = O - I = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$

Una PN con la estructura anterior es conocida como un PN Ordinaria (*Ordinary_PN*).

2.2.1. Tipos

En la figura 5. se muestra un esquema de los tipos de PN más usadas según la Manufacturing System Integration Lab. y que presentada el Ph. D. Hyunbo Cho, del Department of Industrial Engineering, Pohang University of Science & Technology. En ella se observan las derivaciones de las PN.

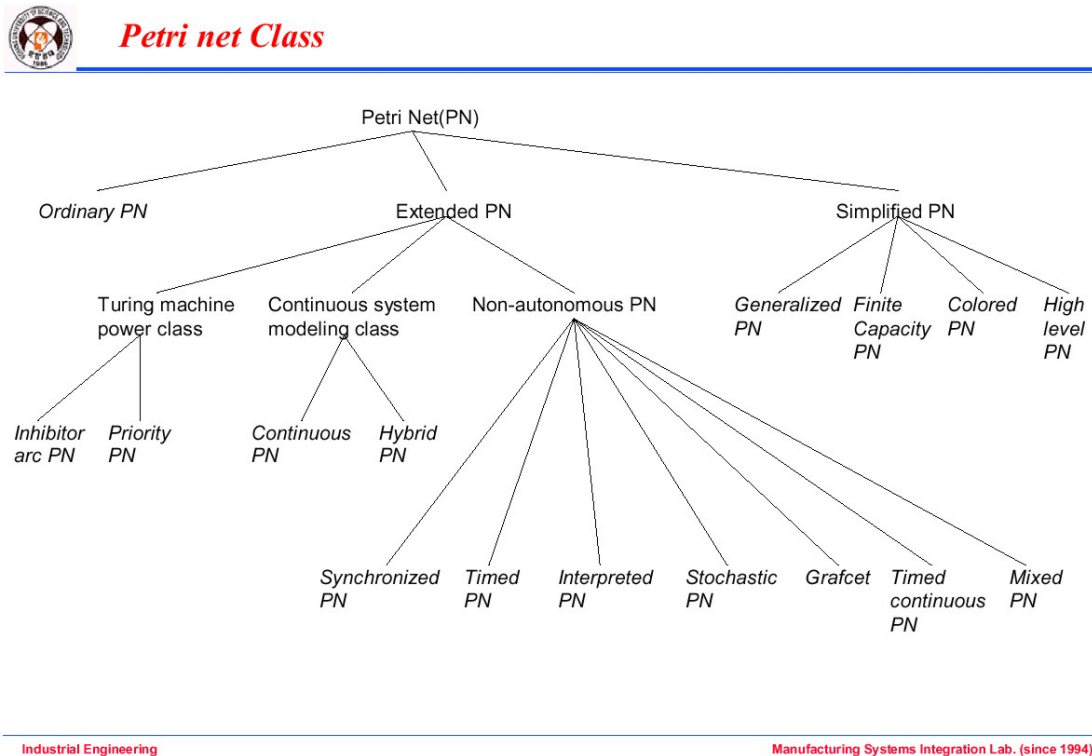


Figura 2.5. Tipos de PN según Pohang University of Science & Technology.

Las *Ordinary PN* son las que se han utilizado en este anexo para mostrar su funcionamiento y aplicación en los sistemas de manufactura. Sin embargo, para la representación de un sistema complejo de manufactura puede ser necesario utilizar varios tipos de PN mostradas en el gráfico anterior. En la actualidad se siguen desarrollando investigaciones a cerca de las PN, las cuales resultan en nuevos tipos de PN para diferentes necesidades, tal es el caso de la PN introducida por Zhou [40] y que no se encuentra en la clasificación anterior, y que el autor a denominado como *Augmented-Timed Petri Nets For Modeling Breakdown Handling*, la cual introduce consideraciones de paros en proceso debido a fallas diversas y que en los modelos de PN no son consideradas sino con la extensión del propio modelo. La nueva PN utiliza otros elementos como son *Posiciones de desactivación*, *Transiciones de desactivación*, *arcos de activación y desactivación* y *arcos secundarios*.

2.2.2. Modelado con PN

Utilizando la ecuación de la regla de ejecución y disparo presentada anteriormente es posible obtener las marcaciones de una PN a través del disparo de las transiciones. Para ello es necesario la marcación inicial y la matriz de incidencia obtenida del modelo PN. Por ejemplo, para la PN presentada en la figura 2.6. tenemos que la siguiente descripción estructural de la red:

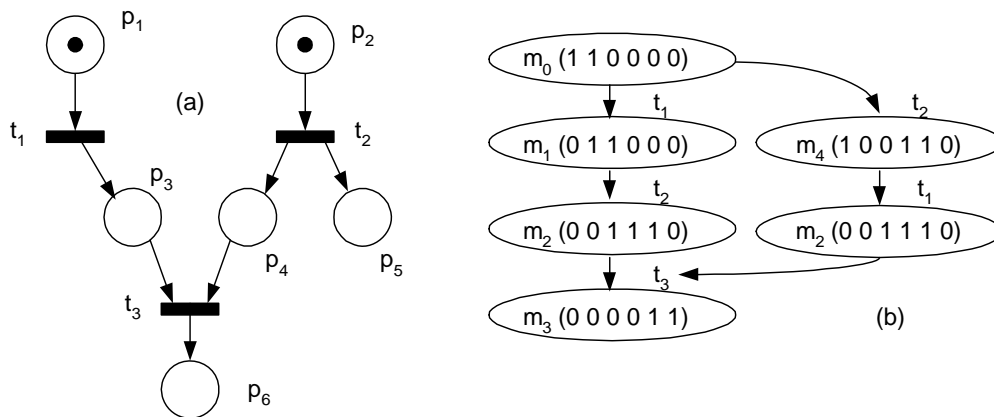


Figura 2.6. (a) Modelo PN y su (b)Gráfica de alcanzabilidad.

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\}$$

$$T = \{t_1, t_2, t_3\}$$

$$I(p_1, t_1) = 1, I(p_1, t_2) = 0, I(p_1, t_3) = 0; O(p_1, t_1) = 0, O(p_1, t_2) = 0, O(p_1, t_3) = 0;$$

$$I(p_2, t_1) = 0, I(p_2, t_2) = 1, I(p_2, t_3) = 0; O(p_2, t_1) = 0, O(p_2, t_2) = 0, O(p_2, t_3) = 0;$$

$$I(p_3, t_1) = 0, I(p_3, t_2) = 0, I(p_3, t_3) = 1; O(p_3, t_1) = 1, O(p_3, t_2) = 0, O(p_3, t_3) = 0;$$

$$I(p_4, t_1) = 0, I(p_4, t_2) = 0, I(p_4, t_3) = 1; O(p_4, t_1) = 0, O(p_4, t_2) = 1, O(p_4, t_3) = 0;$$

$$I(p_5, t_1) = 0, I(p_5, t_2) = 0, I(p_5, t_3) = 0; O(p_5, t_1) = 0, O(p_5, t_2) = 1, O(p_5, t_3) = 0;$$

$$I(p_6, t_1) = 0, I(p_6, t_2) = 0, I(p_6, t_3) = 0; O(p_6, t_1) = 0, O(p_6, t_2) = 0, O(p_6, t_3) = 0;$$

$$m = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$$

Las funciones de entrada y salida representadas como matrices son:

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ y } O = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ Y la matriz de incidencia } C = O - I = \begin{matrix} & \begin{matrix} t_1 & t_2 & t_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \end{matrix} & \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Ahora bien, con la marcación inicial y la matriz de incidencia es posible determinar las marcaciones de la PN. Para esto se utiliza la fórmula presentada en las reglas de ejecución. Por ejemplo, para determinar la siguiente marcación de la PN si se dispara la transición t_1 , se obtiene:

$$M'(p) = m(p) - I(p, t) + O(p, t), \forall p \in P$$

$$m_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^\tau + (-1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^\tau$$

$$m_1 = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^\tau$$

Donde $(-1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$ es la columna debajo de t_1 en la matriz de incidencia la cual representa a “ $-I(p, t) + O(p, t), \forall p \in P$ ” de la fórmula, y es transpuesta (τ) para poder llevar a cabo la operación aritmética. Si ahora disparamos a t_2 obtenemos lo siguiente:

$$m_2 = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)^\tau + (0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0)^\tau$$

$$m_2 = (0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0)^\tau$$

Donde $(0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0)^\tau$ es la columna debajo de t_2 .

Si se continua con este procedimiento se obtendrá la RG de la PN que se muestra en la figura 2.25. Es importante notar que no es posible disparar cualquiera de las transiciones si estas no satisfacen en punto 1 de las reglas de ejecución, ya que de lo contrario se obtendrán resultados no válidos como se muestra si con la marcación inicial se dispara t_3 .

$$m_1 = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^\tau + (0 \ 0 \ -1 \ -1 \ 0 \ 1)^\tau$$

$$m_1 = (1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 0 \ 1)^\tau$$

Lo que no es posible ya que no existen valores negativos de los tokens en las posiciones, es decir, p_3 y p_4 , necesitan tener tokens para que t_3 pueda ser disparada.

En la tabla 2.1. se muestra dos interpretaciones para las posiciones, las transiciones y los arcos. En la tabla 2.2. se presenta algunos conceptos para la manufactura y su equivalente en el modelado usando PN.

Elemento de la PN	Primera interpretación	Segunda interpretación
Posición (Place)	Estado de los recursos y operaciones	Estado de recursos y condiciones
Transición (Transition)	Inicio y/o fin de operaciones, procesos, actividades, y eventos	Operaciones, procesos, actividades y eventos.
Arcos (directed arcs)	Material, recursos, información, y/o dirección de control de flujo	

Tabla 2.1. Interpretación para los elementos de una PN.

Conceptos en la Manufactura	Modelado con PN
Movimiento ó tamaño del lote de producción	Peso de los arcos modelando el movimiento o la producción con Kanban
Número de recursos, ej. AGV's, máquinas, estaciones, y robots.	El número de tokens en las posiciones que modelan la cantidad del recurso correspondiente
Capacidad de una estación	El número de tokens en la posiciones modelando su disponibilidad
Trabajo en proceso (WIP)	El número de tokens en las posiciones modelando los contenedores y operaciones de todas las máquinas
Volumen de producción	EL número de tokens en las posiciones modelando el número de disparos de transiciones que modelan la terminación de un producto.
El tiempo de una operación, ej. Preparación, procesamiento, y carga	Tiempo asociado con la posición o transición modelando la operación
Tiempo de transportación	Tiempo asociado con los arcos, posiciones, o transiciones modelando la transportación.
Estado del sistema	Marcación PN (más la información de tiempo para PN temporizadas)
Secuencia, concurrencia, conflictos, recursos compartidos, etc.	Modelado con diferentes módulos PN

Tabla 2.2. Conceptos en la Manufactura y su equivalente para el modelado usando PN.

Un sistema de manufactura automatizado consiste en una variedad de componentes que van desde robots, máquinas, materias primas, sensores, actuadores, computadoras y accesorios relacionados con un proceso en específico. En las fases de modelado, es necesario enfocarse en las operaciones mayores y sus precedencias, concurrencia y relaciones conflictivas.

Las relaciones básicas entre estos procesos u operaciones pueden ser clasificados como:

Secuenciales: Si una operación sigue a otra, entonces las posiciones y transiciones que las representan deben formar una cascada o relación secuencial en una PN. Figura 2.7.(a).

Concurrentes: Si dos operaciones son inicializadas por un evento, estas forman una estructura paralela iniciando con una transición, por ejemplo, dos posiciones son dos salidas de la misma transición. Figura 2.7.(b).

Conflicto: Si una de dos operaciones son resultado de una operación anterior, entonces dos transiciones forman dos salidas de la misma posición. Figura 2.7.(c).

Cíclicos: Si una secuencia de operaciones sigue a una después de la otra y la terminación de la última da inicio a la primera, entonces una estructura cíclica se forma con estas operaciones. 2.7.(d).

Mutualmente Exclusivos: Dos procesos son mutuamente exclusivos si no pueden realizarse al mismo tiempo dado las restricciones de utilización de los recursos compartidos. Una estructura de este tipo es aquella que tiene un posición marcada con un token y con múltiples arcos de salida y entrada para activar un proceso. Por ejemplo, un robot que es utilizado por dos máquinas para la carga y descarga. En la figura 2.7.(e) se muestra este ejemplo.

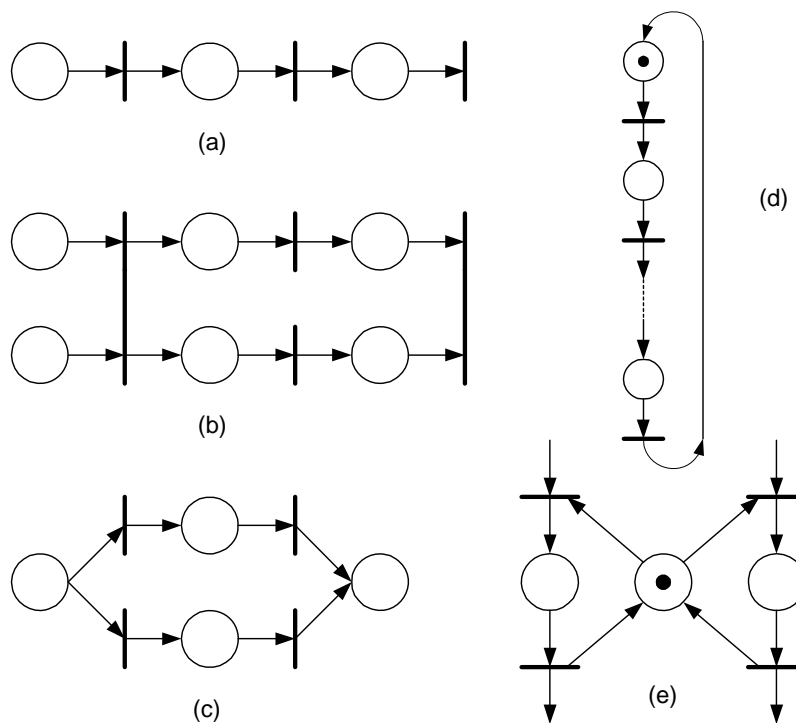


Figura 2.7. Relaciones básicas. (a) Secuencial, (b) Concurrente, (c) Conflicto, (d) Cíclicos, (e) Mutualmente exclusivos.

Los recursos pueden ser clasificados como específicos ó compartidos. Los específicos tienen como característica una posición con un solo arco entrada y un solo arco de salida; los recursos compartidos se caracterizan por sus múltiples arcos de entrada y múltiples arcos de salida. Una condición que representa el estado de un sensor o un actuador es a través de una posición conteniendo un token que implica la condición verdadera del sensor ó del actuador. El mismo tipo de recursos puede ser representado por una posición con un número de tokens correspondiente al número de recursos. La inicialización de una operación algunas veces requiere de varias condiciones y disponibilidad de recursos lo que se modela como una transición con varias posiciones de entrada. La finalización de una operación puede liberar algunos recursos y cambiar el estado de las condiciones lo que se modela con una transición con varias posiciones de salida.

Un método general para el modelado puede ser resumido a través de los siguientes pasos:

Identificación de las operaciones y los recursos: Dada una descripción de un sistema industrial automatizado, identificar los eventos principales, las operaciones, los procesos, los recursos, las condiciones, la información sobre rutas, etc.

Identificación de relaciones: Las relaciones entre los eventos, las operaciones, y /o procesos deben determinarse. Los recursos deben ser divididos en diferentes clases y de acuerdo a sus políticas de utilización principales para aquellos que sean compartidos, y la información de rutas de los productos debe determinarse. Solo entonces una estructura inicial de la red puede obtenerse.

Diseño de la PN: Se diseña y se etiquetan las posiciones y las transiciones que representen eventos, operaciones y /o procesos. Se ordenan de acuerdo con las relaciones identificadas en el paso 2. Se designan y etiquetan las posiciones que modelan el estado de los recursos y las condiciones. Se añaden las posiciones y transiciones necesarias de tal forma que dos posiciones ó transiciones no se unan entre sí. Para cada transición se le dibuja un arco de entrada que llega desde una posición(place) si su disponibilidad requiere de un recurso, de una cierta condición, ó de la finalización de la operación representada por esa posición; se dibuja un arco de salida que va de la transición a una posición si un disparo libera recursos, cambia condiciones, ó indica la inicialización de una operación en la posición. El número de arcos de entrada desde una posición a una transición debe igualar la cantidad de tokens requeridos en la posición que hace que la transición esté disponible. El número de arcos de salida desde la transición a una posición debe igualar la cantidad de los tokens a ser producidos una vez que la transición a sido disparada. Se determina el número inicial de tokens en las posiciones de acuerdo con el estado inicial del sistema. Se asocian otras características como tiempo si es necesario.

Modificación de la PN: Verifique el modelo para saber si refleja la operación del sistema y modifique la red hasta que el sistema quede modelado.

Algunos sistemas no pueden ser modelados usando PN ordinarias a menos que algunas extensiones sean usadas, como los arcos inhibidores ó transiciones de prioridad. En

particular, los arcos inhibidores son usados para deshabilitar una transición cuando una posición contiene tokens, lo que implicaría una cierta condición dada.

A continuación se explican algunos módulos usados en el modelado de FMS usando PN.

- (a) **Módulo Recurso/ Operación:** Describe una operación simple que requiere de un recurso específico. Este módulo se muestra en la figura 2.8.(a), donde las posiciones p_1 y p_3 pueden representar buffers para el almacenamiento de piezas. La posición p_4 representa la disponibilidad de la capacidad simple ó múltiple del recurso. Las interpretaciones para t_1 y t_2 pueden ser:
- La transición t_1 y t_2 describen el inicio y el fin de una operación, y p_2 representa la operación.
 - t_1 y t_2 representan carga y descarga, y p_2 representa la operación.
 - t_1 y t_2 representan la preparación y operación ó procesamiento, y p_2 representa el estado del recurso a ser procesado.
- (b) **Módulo de mantenimiento periódico de Recurso/ Operación:** El módulo anterior puede ser expandido para un recurso que requiere de mantenimiento periódico. Supóngase que se requiere de un mantenimiento periódico cada k procesos. Ver figura 2.8.(b). La posición p_4 está inicialmente marcada con k tokens, lo que significa que el recurso puede ser usado k veces consecutivas. La posición p_6 se requiere para garantizar que una operación se lleve a cabo en tiempo. La transición t_3 está disponible únicamente después que la posición p_5 acumula k tokens. Un retardo puede asociarse con t_3 para indicar el tiempo requerido para el servicio de mantenimiento.
- (c) **Módulo de falla de Recurso/ Operación:** El módulo en la figura 2.9.(a) puede ser aumentado para representar este módulo al asociarle un ciclo (*loop*), que se muestra en la figura 2.8.(c). La transición t_3 significa que la máquina falla y t_4 significa que ha sido reparada. La posición p_5 se mantiene para representar que el recurso ha sido reparado.
- (d) **Módulo de prioridad:** Describe diferentes reglas las cuales requieren de diferentes recursos específicos. En la figura 2.8.(d) se ha asociado un recurso específico para cada ruta. Estos recursos pueden mostrar diferentes desempeños. Esto quiere decir que cuando una pieza está lista para ser procesada por uno de estos recursos, podrá pasar por aquel que tenga la mayor prioridad. Esta prioridad se determina por los tiempos de proceso, funciones de calidad, etc.
- (e) **Módulo de Re-trabajos:** Si un proceso falla, la pieza puede necesitar re-trabajo aunque en muchos casos la pieza es considerada como desperdicio (*scrap*) en muchos casos. El módulo se muestra en la figura 2.8.(e) donde se introduce una transición que reorienta a una pieza nuevamente a la posición p_1 .

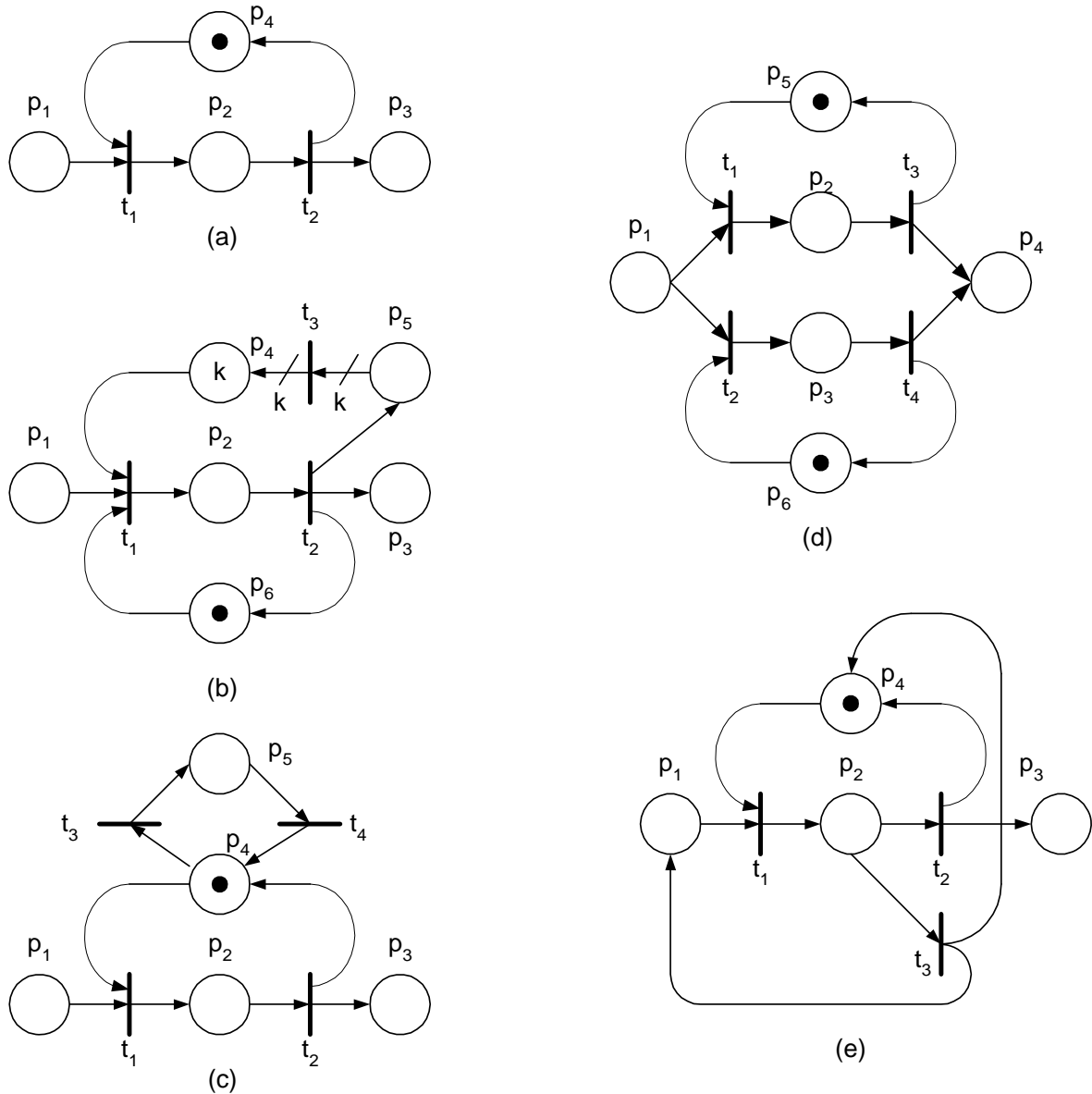


Figura 2.8. Módulos comúnmente usados en el modelado de FMS. (a) Recurso/ Operación, (b) Mantenimiento periódico de Recurso/ Operación, (c) Falla de Recurso/ Operación, (d) Prioridad, (e) Re-trabajo.

Los módulos anteriores pueden ser integrados como parte de un modelo PN completo, lo cual se obtiene de la siguiente forma:

1. Posiciones compartidas. Estas posiciones son comúnmente recursos compartidos para diferentes operaciones y procesos.
2. Transiciones compartidas. Sirven como puntos de sincronización.
3. Rutas compartidas que pueden iniciar con una posición ó una transición y finalizar con una posición ó transición diferente.
4. Estructuras PN añadidas como una interface para unir dos ó más módulos.

Por ejemplo, suponiendo que un proceso de manufactura requiere ciertos pasos: q_1 a q_5 , utilizando los recursos M_1 a M_5 y M_2' . Y si se hacen la siguientes consideraciones: q_1

requiere de M_1 , q_2 requiere de M_2 ó M_2' . M_2 tiene fallos periódicos, por lo que M_2' está disponible si esto ocurre. M_3 y M_5 son requeridos por q_3 y q_5 respectivamente para el procesamiento y la inspección. Si no se satisface en M_3 , es necesario su reprocesamiento desde q_2 . Si no se satisface en M_5 se hace el reproceso desde M_5 . M_4 se requiere para q_4 , el cual requiere de mantenimiento cada k procesos. La capacidad de los buffers está disponible en todo momento. La representación del proceso anterior se muestra en la figura 2.9.

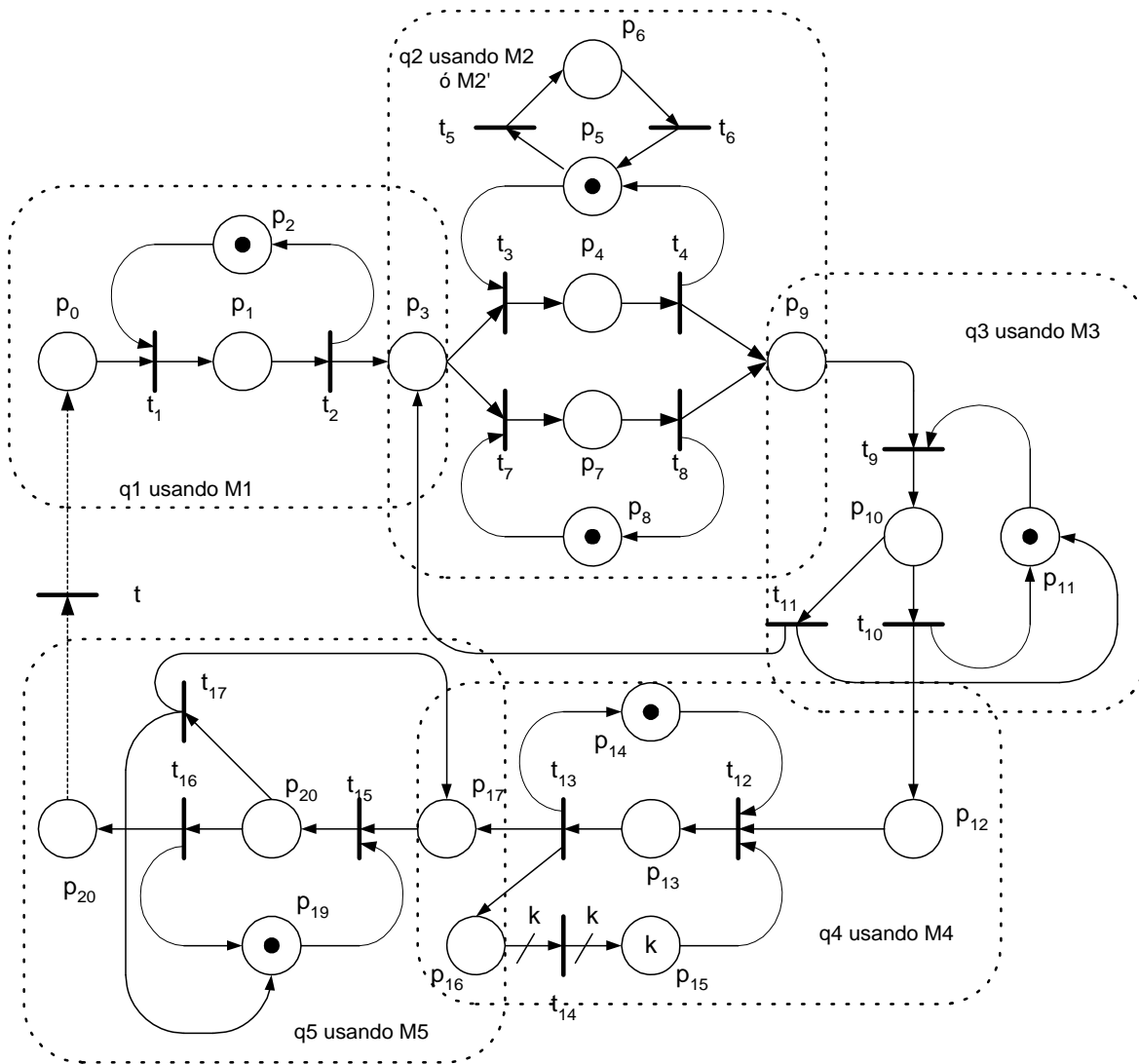


Figura 2.9. Ejemplo de la unión entre diferentes módulos para un modelo PN completo.

2.2.3. Modelado de secuencias para PLCs utilizando Redes de Petri (PN).

Como se presentó anteriormente el modelo PN nos permite representar los elementos, condiciones e interrelaciones en un sistema de manufactura o un FMS, pero también nos permite crear la programación de las secuencias de los dispositivos si éstos están controladas como por ejemplo un controladora lógico programable (PLC). En la figura 2.10 se presenta un proceso de traslado de caja mediante cilindros neumáticos que se accionan en la secuencia indicada en la figura. En la figura 2.11 se presenta el modelo PN de la secuencia con el estado inicial o la m_0 con las condiciones iniciales de los cilindros, de las plataformas y de la botonera.

La transición T7 representa el fin del proceso pero también el ciclado del mismo. En el Place Plat1 el Token representa la caja en la plataforma 1 y en Plat2 se obtendrá el Token después de haber disparado las secuencias T1, T2 y T3. Los sensores en los cilindros y la caja en las plataformas son los elementos de entrada mientras que los actuadores o elementos de salida que han sido modelados son únicamente los botones de inicio y paro, los cilindros A, B, y C (CA, CB, CC).

Los Places a1mirror y b1mirror son réplicas del estado de retroceso de los cilindros CA y CB que permiten lograr la secuencia enunciada en el ejemplo y que se transformaran en condiciones previas a la inicialización o desactivación de salidas o actuadores.

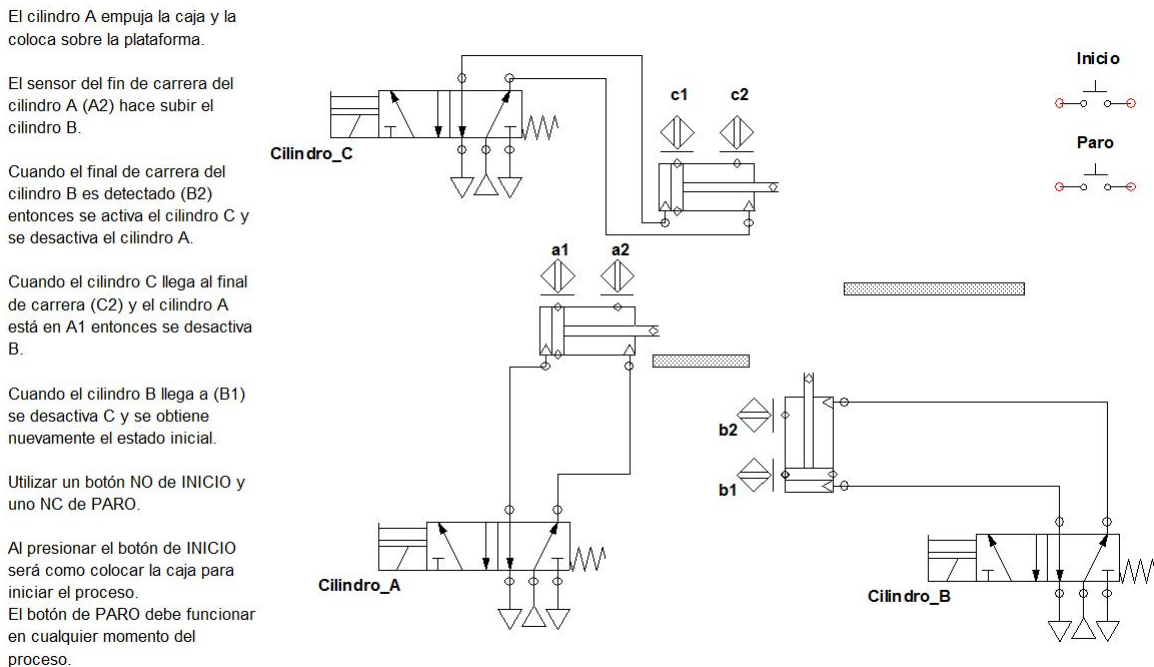


Figura 2.10. Ejemplo de una secuencia automatizada para trasladar cajas utilizando un PLC y equipos neumáticos.

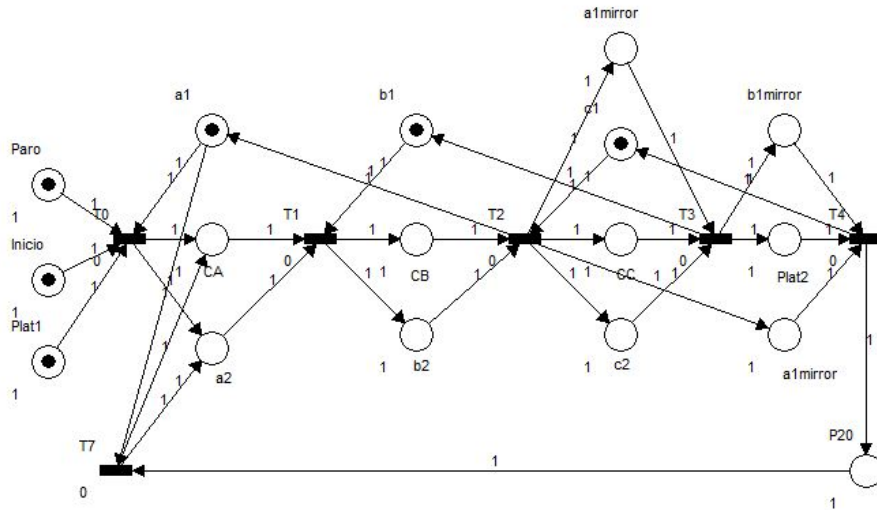


Figura 2.11. Modelo en PN del proceso de traslado de cajas (m_0).

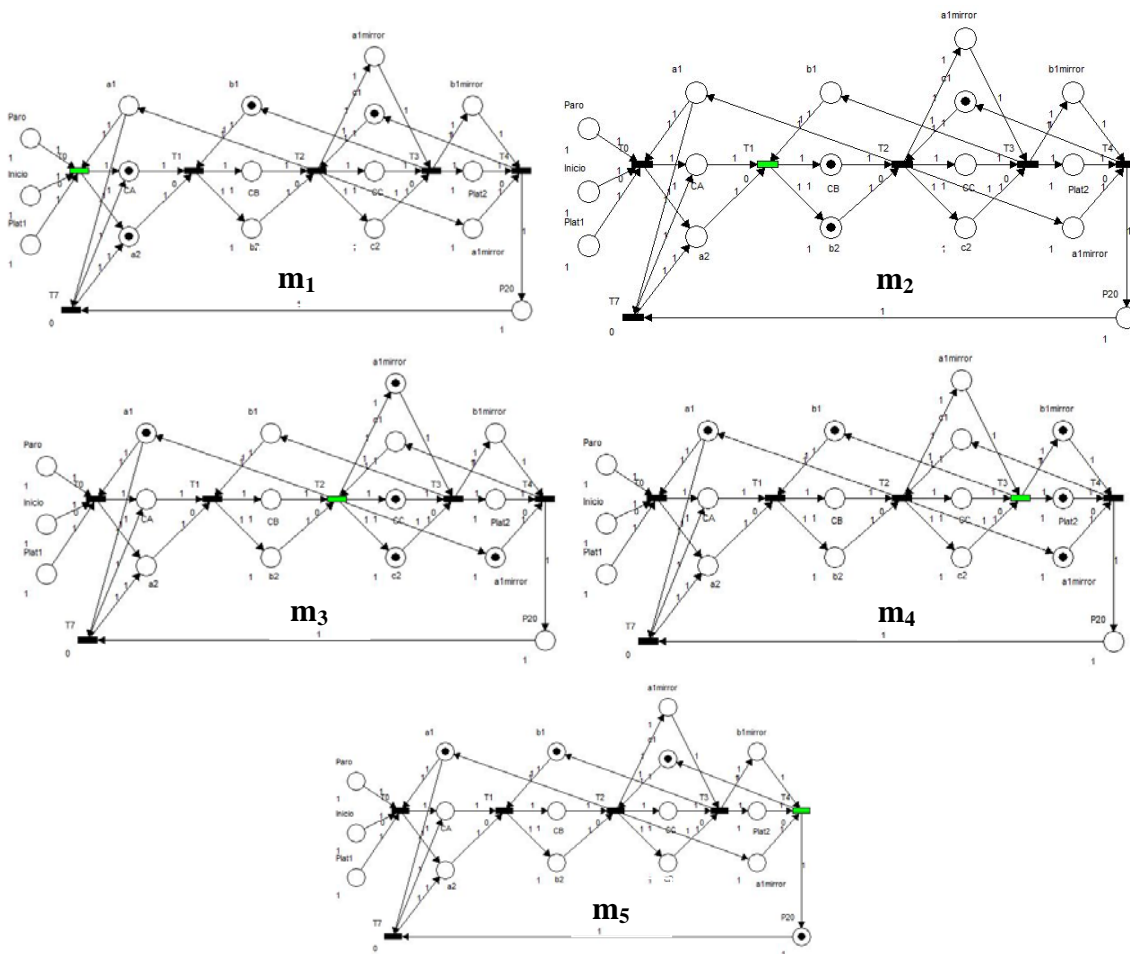


Figura 2.12. Modelo en PN del proceso de traslado de cajas (m_1, m_2, m_3, m_4, m_5).

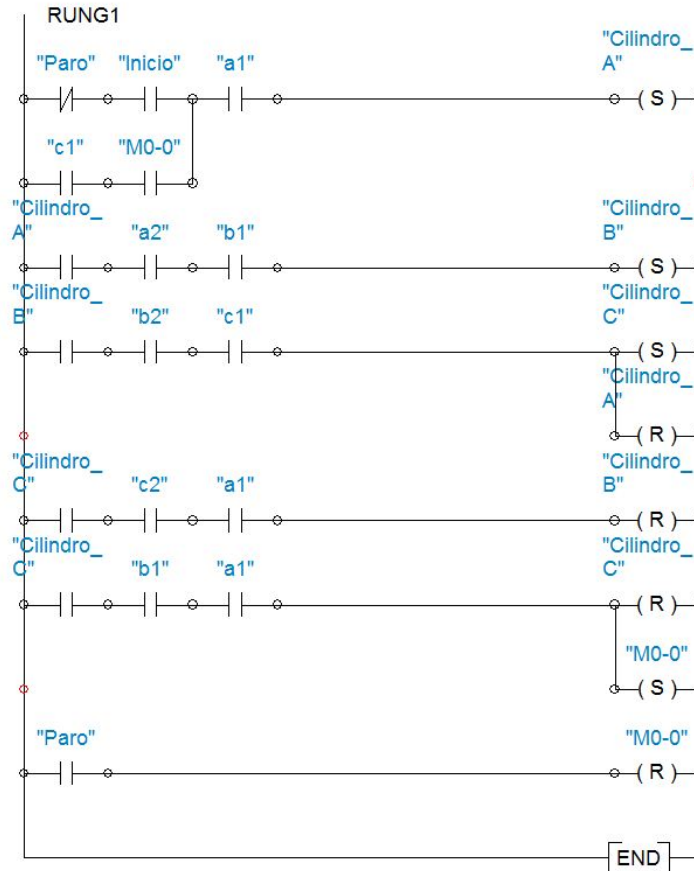


Figura 2.13. Programa en lenguaje de escalera para el proceso de traslado de cajas.

En la figura 2.13. se muestra el programa de escalera para el PLC pero que es resultado del modelo PN al analizar la dirección de los arcos donde los de entrada representan los contactos de entrada y el tipo de función lógica como AND y OR y los arcos de salida identifican los accionamientos o desactivaciones (Set o Reset). Para otras funciones de programación se puede ocupar la secuencia obtenida como base simplificando el tiempo de programación y aportando un modelo que representa el proceso y que servirá como plataforma de análisis y mejora.

2.3.Simulación de FMS.

Un sistema es un grupo de entidades como personas o máquinas que interactúan para lograr un objetivo. El objetivo de un FMS fue presentado en el capítulo anterior y nos permite entender el comportamiento del sistema a través de los componentes que lo integran. Los eventos en un sistema pueden ser discretos o continuos o la mezcla de ambos pero al estudiarlos se puede optar por analizarlos de forma matemática o física, mediante una solución analítica o probabilística como la simulación[42] (fig. 2.14). En muchos sistemas de manufactura y en el FMS en particular la complejidad del sistema y los objetivos perseguidos al estudiarlos hacen de la simulación una herramienta muy utilizada y confiable.

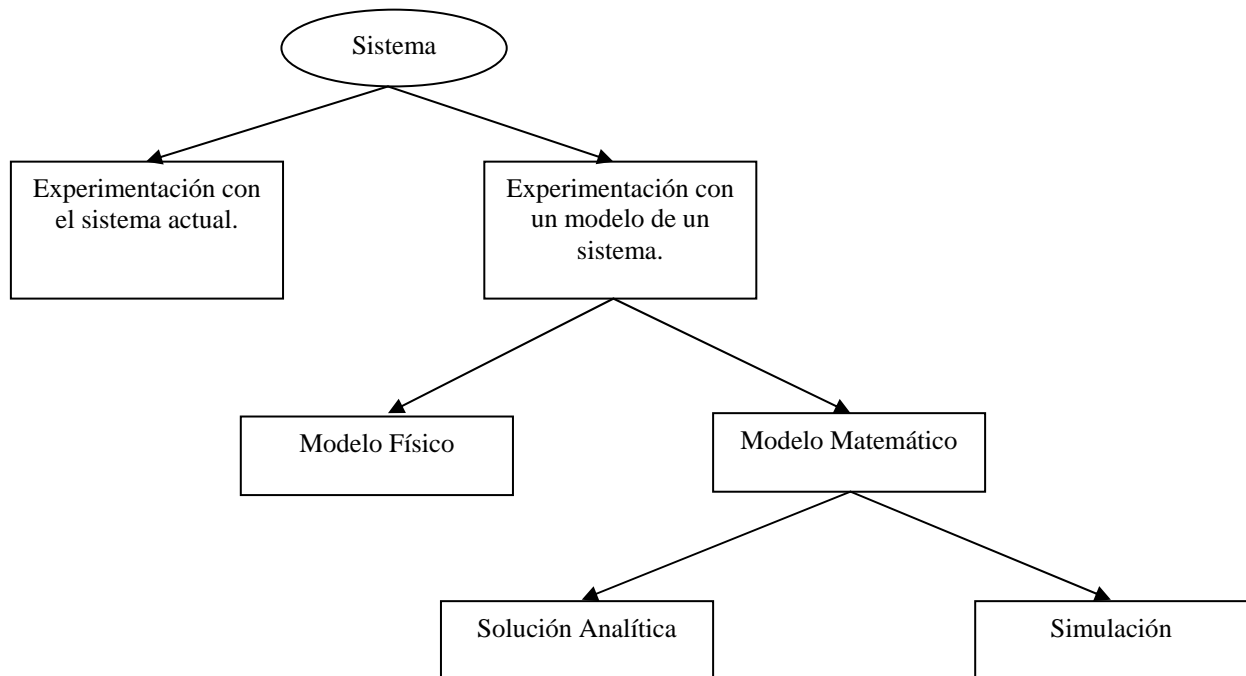


Figura 2.14. Formas de analizar un sistema. Fuente [42]

De la simulación de sistemas existen varias herramientas que en forma de lenguaje o de programas especializados ayudan a modelar y entender el comportamiento de las entidades y los recursos involucrados. Como menciona Law y Kelton [42] es muy importante decidir que software utilizar para analizar un sistema ya que debe ser lo suficientemente flexible y amigable de usar. A continuación se presentan las ventajas del software de simulación sobre los lenguajes de simulación:

- El software de simulación proporciona una gran cantidad de componentes, dispositivos y entidades que tomarían mucho tiempo desarrollar en algún lenguaje de simulación.
- El software de simulación posee las reglas y las principales disciplinas de manejo de entidades que un lenguaje de programación habría que programar.
- Los modelos de simulación pueden ser modificados de forma sencilla una vez creados.
- Detección de errores de forma más eficiente debido al proceso de detección automática.

En el caso de los lenguajes de programación presentan las siguientes ventajas:

- Un programa requiere de menor tiempo de simulación y de recursos de hardware de la computadora en la cual se está ejecutando.
- El lenguaje de simulación de un programa permite mucha más flexibilidad.
- El costo de un programa de simulación es más económico que un software especializado.

A continuación se describe el software de simulación QUEST® que combina las ventajas tanto del software especializado como del lenguaje de simulación y con el cual se harán las pruebas del modelo virtual.

2.3.1 Simulación con QUEST®

Quest® (queueing event simulation tool) es un programa de simulación de procesos de manufactura en tres dimensiones (3D) para eventos discretos. Se utiliza como herramienta para asegurar la relación costo beneficio en el diseño de plantas de producción, identificando y entendiendo los problemas en los procesos para evaluar las propuestas de mejora.

En Quest® se pueden crear modelos en dos dimensiones (2D) y modelar de manera indirecta las distancias y manejos de materiales entre procesos, sin embargo, es posible crear modelos en 3D que nos permite incluir de manera confiable la distancia entre sistemas de transporte, los tiempo de recorrido de robots y máquinas y muchas características de dispositivos utilizados en la manufactura como son:

1. Accesorios: Geometrías usadas para dar mayor realismo a la simulación
2. AGV: Transportadores como vagones, vehículos guiados automáticamente, remolques, etc.
3. Buffers: Almacenadores de piezas ó productos.
4. Bandas transportadoras: para movimiento continuo de piezas ó productos.
5. Falla y Reparación: Simulación de fallas y reparaciones.
6. Trabajadores: Operadores de equipo y transportadores de piezas ó productos.
7. Máquinas: Procesadoras de piezas ó productos.
8. Partes, entidades: piezas, herramientas, dispositivos de sujeción, etc.
9. Transportador Aéreo (Power and free):
10. Procesos: detalles de procesos de carga, descarga y procesamiento de piezas o productos.
11. Pozo (Sink): consume piezas ó productos
12. Fuente (Source): generador de entidades (piezas).

El flujo de entidades se realiza al determinar que elemento es el inicial y cual elemento es el final lo que implica una selección simple de entidades en el modelo 3D. Existe otro método de asignación del flujo de entidades al especificar las reglas de movimiento de entidades dependiendo de las circunstancias. La selección de reglas puede ser desde una librería predeterminada o pueden ser personalizadas mediante el lenguaje SCL (Simulation Control Language) que permite mayor flexibilidad y realismo al modelo y a la simulación. En la figura 2.15. se muestran las principales reglas para el flujo de entidades y donde *User Func* nos permite seleccionar una rutina en lenguaje SCL.



Figura 2.15. Reglas para el flujo de entidades en el modelo.

La ejecución del modelo en QUEST permite la navegación en 3D y la modificación de parámetros para observar el desempeño de la simulación no solo desde el equipo local sino que es posible la interrelación con otros usuarios a distancia mediante la opción VCE (Virtual Collaborative Engineering) que permite visualizar y manipular el modelo 3D.

Los resultados de la simulación pueden presentarse en reportes en forma de tablas que muestran por ejemplo el recurso con la utilización máxima o los promedios de producción. Las estadísticas de cada elemento también son presentadas en reportes completos donde se muestra su utilización, su disponibilidad, fallas y recuperación etc. Los reportes pueden ser personalizados para mostrar mayores detalles del modelo y los parámetros de la simulación.

En las figuras 2.16 y 2.17 se muestran el reporte de resultados del modelo y el reporte por elemento indicando detalles al final de la simulación.

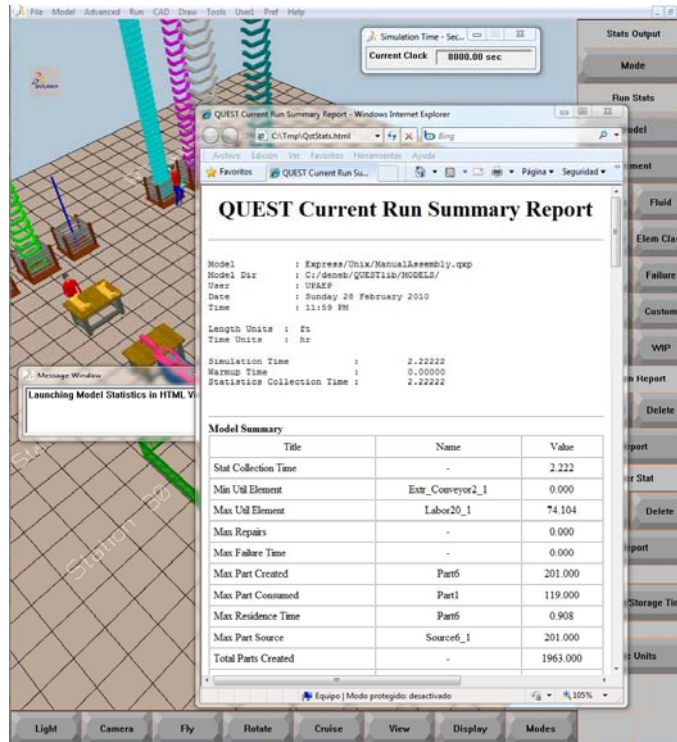


Figura 2.16. Reporte de resultados del modelo.

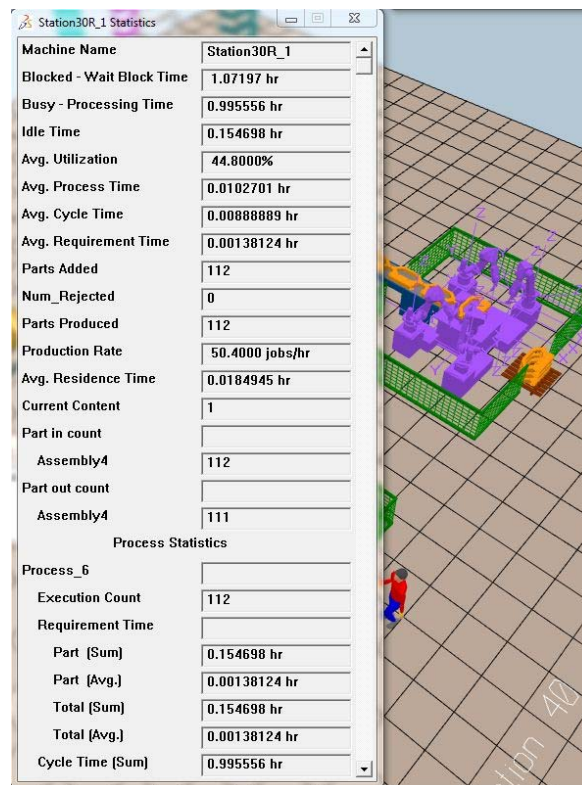


Figura 2.17. Reporte de resultados de un elemento.

Se pueden crear escenarios que serán ejecutados y comparados por QUEST® para evaluar las condiciones del modelo y los resultados obtenidos de cada corrida. La ejecución de procedimientos y reglas de decisión durante la simulación pueden ser directamente seleccionadas desde las opciones predefinidas del programa o pueden ser escritas en el Lenguaje de Control de la Simulación (SCL). Se pueden modificar o escribir nuevos programas SCL, ya que la arquitectura abierta de la plataforma permite el modelado con un alto nivel de detalle lo que es posible debido a las siguientes características:

1. Acceso a la información del estado del modelo.
2. Control de eventos.
3. Archivo de entradas y salidas
4. Documentación en línea
5. Comunicación con lenguajes de programación como C.
6. Rutinas y manejo de texto estándar.
7. Programación estructurada.
8. Uso de variables, listas dinámicas y estructuras de programación.

El lenguaje de control por bloque (Block Control Language, BCL) es usado para crear una serie de corridas con escenarios alternativos sin la intervención del usuario. *“Con la implementación adecuada de QUEST® los usuarios pueden visualizar y prevenir problemas potenciales y mejorar procesos existentes, adicionalmente es una herramienta poderosa para diseñar, analizar y visualizar procesos de manufactura complejos...”*¹⁹

Existen otros programas de simulación en 3D que tienen de forma similar la flexibilidad de QUEST®, entre los más utilizados están:

Producto	Compañía	Simulación	Interfase CAD
FleXsim	Flexsim Software Products, Inc	Eventos discretos y continuos	Objetos nativos e importados en 3D y animación realística
ARENA	Rockwell Automation	Eventos discretos y semi-continuos	Opcional - 3DPlayer crear ambientes en 3D utilizando librerías de formas o importando geometrías.
ProModel	ProModel Corporation	Eventos Discretos	Opcional – 3D Animator para presentación de ambientes importando geometrías.

En el siguiente capítulo se analiza el estado actual del Sistema de Manufactura LPAIC de UPAEP y se presentan las representaciones en 3D para dar mayor detalle a la simulación en QUEST®. Posteriormente se presentan diferentes escenarios que nos ayudarán a determinar las condiciones de fabricación que propician la ocurrencia de fallas suaves y duras en el sistema.

¹⁹ Bzymek M. Zbigniew, Nunez Manuel, Simulation of Machinig Sequence Using DELMIA/QUEST Software. Computer-Aided Design and Application, 2008

Capítulo 3

Sistema Experimental y su Modelo
Virtual

3.1. Descripción del modelo de estudio.

El objeto de estudio en ésta investigación se centra en el equipo didáctico LPAIC desarrollado por la empresa DEDUTEL y que se encuentra instalado en los laboratorios de UPAEP. Este sistema es un emulador de un FMS el cual tiene como procesos principales de fabricación máquinas CNC para arranque de viruta y un proceso de llenado y sellado de latas las cuales están interconectadas por una banda transportadora de velocidad variable y monitoreo de posición de vagones los cuales son almacenados y suministrados por un almacén cartesiano de 30 bahías. A continuación se presenta una descripción de los equipos y sus características.



Figura 3.1. FMS LPAIC de UPAEP.

3.1.1. Celda de Manufactura

Esta estación cuenta con una arreglo lineal de máquinas controladas numéricamente, (torno y fresadora) unidas por un robot de 5 + 1 grados de libertad en una configuración tipo gantry. A continuación se describen las características de flexibilidad e integración de los dispositivos que integran ésta estación.

3.1.1.1. Centro de Maquinado CNC

Es una máquina Fresadora de 3 ejes marca EMCO ConceptMill 155 con un controlador Fanuc serie 21M y un carrusel de 9 herramientas más 1 de calibración. Cuanta con un sistema de sujeción tipo prensa de mordazas neumáticas accionadas automáticamente desde la consola del equipo o mediante comando de programación. En las figuras 3.2 y 3.3 se presentan las principales características del equipo.

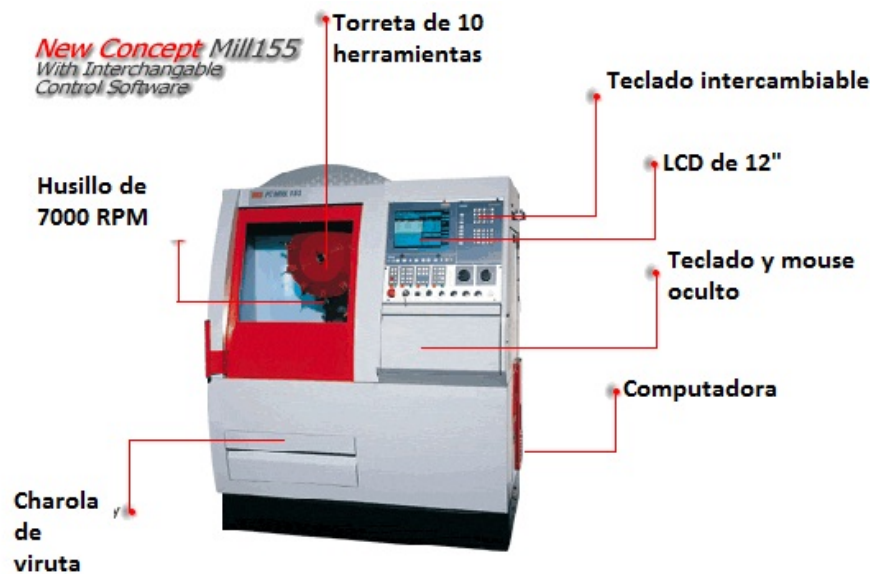


Figura 3.2. Componentes principales de la fresadora EMCO del FMS de UPAEP.

Concept Mill 155 Specifications

- Travel (X/Y/Z) : 300/200/300 mm
- Milling table (L x W) : 520 x 180 mm
- Spindle speed range : 150-5000 or 1000 R/min
- Rapid traverse : 7.5 m/min
- Feed rate : 0-4 m/min
- Tool system : programmable 10 station turret
- Tool system : similar to ISO 30
- Machine weight : 700 kg
- Power supply: 400 V, 50/60 Hz
- Machine dimensions (LxDxH) : 1502x1284x1925 mm
- 3 axis CNC machining center with interchangeable control systems*
- Optional 4th axis
- Integrated PC and 12" flat display
- Hardened guideways
- Central lubrication
- Machine lamp
- Fully enclosed inclusive chip tray
- Safety system in compliance with CE
- Optional Automation for FMS & CIM if required.

* Fanuc, Siemens, Heidenhain, etc.

Figura 3.3. Principales características de la fresadora EMCO del FMS de UPAEP.

3.1.1.2. Centro de torneado CNC

Es una máquina Torno de 2 ejes marca EMCO ConceptTurn 155 con un controlador Sinumerik Siemens 840D y una torreta de 7 herramientas más 1 de calibración. Cuenta con un sistema de sujeción tipo plato con mordazas de carrera limitada y de accionamiento neumático controlado desde la consola o mediante comando de programación. En las figuras 3.4 y 3.5 se presentan las principales características del equipo.

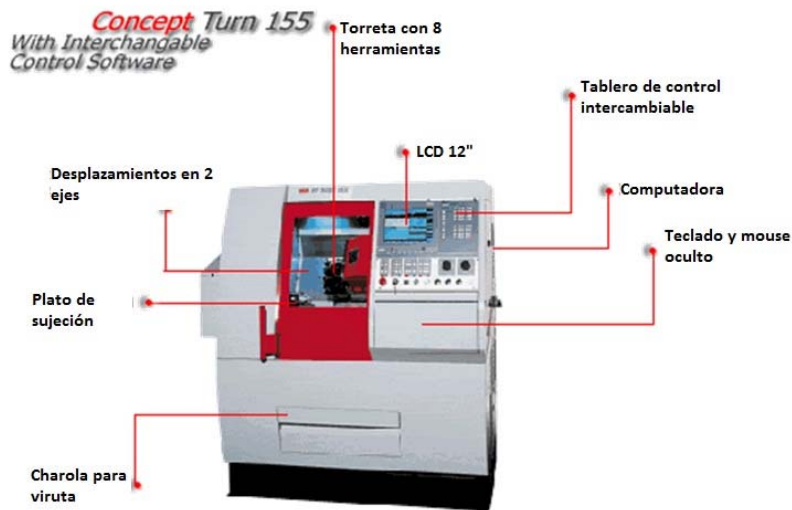


Figura 3.4. Componentes principales de la fresadora EMCO del FMS de UPAEP.

Concept Turn 155 Specifications

- Travel X: 100mm
- Travel Z: 300mm
- Max. size of workpiece: dia. 85mm x 245mm
- Power: 2.8 kW
- Spindle speed: 0 - 4000 rpm
- Rapid traverse: 7.5 m/min
- Feeds: 0 - 4 m³/min
- 6 driven tools, 1.2kW, 0-6000 rpm
- 12 station tool turret VDI 16 (TC-12)
- 12 station tool turret VDI 16 with driven tools (TCM-12)
- Power supply: 400 V, 3/N/PE, 50/60 Hz
- Machine dimensions (LxDxH): 1626x1174x1750 mm
- Weight: 700kg
- CNC lathe with interchangeable control systems*
- Integrated PC and 12" flat display
- Stable grey cast-iron slant bed construction
- Hardened guideways
- 6 driven tools, "C"-axis (TCM-12)
- Through tool coolant supply (TC-12 and TCM-12)
- Central lubrication
- Machine lamp
- Integrated machine stand
- Safety system in compliance with CE
- Fully enclosed inclusive chip tray
- Three-point support of the machine bed

* Fanuc, Siemens, etc.

Figura 3.5. Principales características de la fresadora EMCO del FMS de UPAEP.

3.1.1.3. Robot articulado y riel aéreo.

Es un robot Thermo CataLyst 5, articulado de 5 + 1 grados de libertad montado en un riel aéreo que viaja a lo largo del arreglo línea de las máquinas CNC para realizar operaciones de carga y descarga de material. Así mismo tienen una posición frente a las bandas transportadoras donde toma y deja los materiales. En las figuras 3.6 y 3.7 se presentan las principales características del equipo.

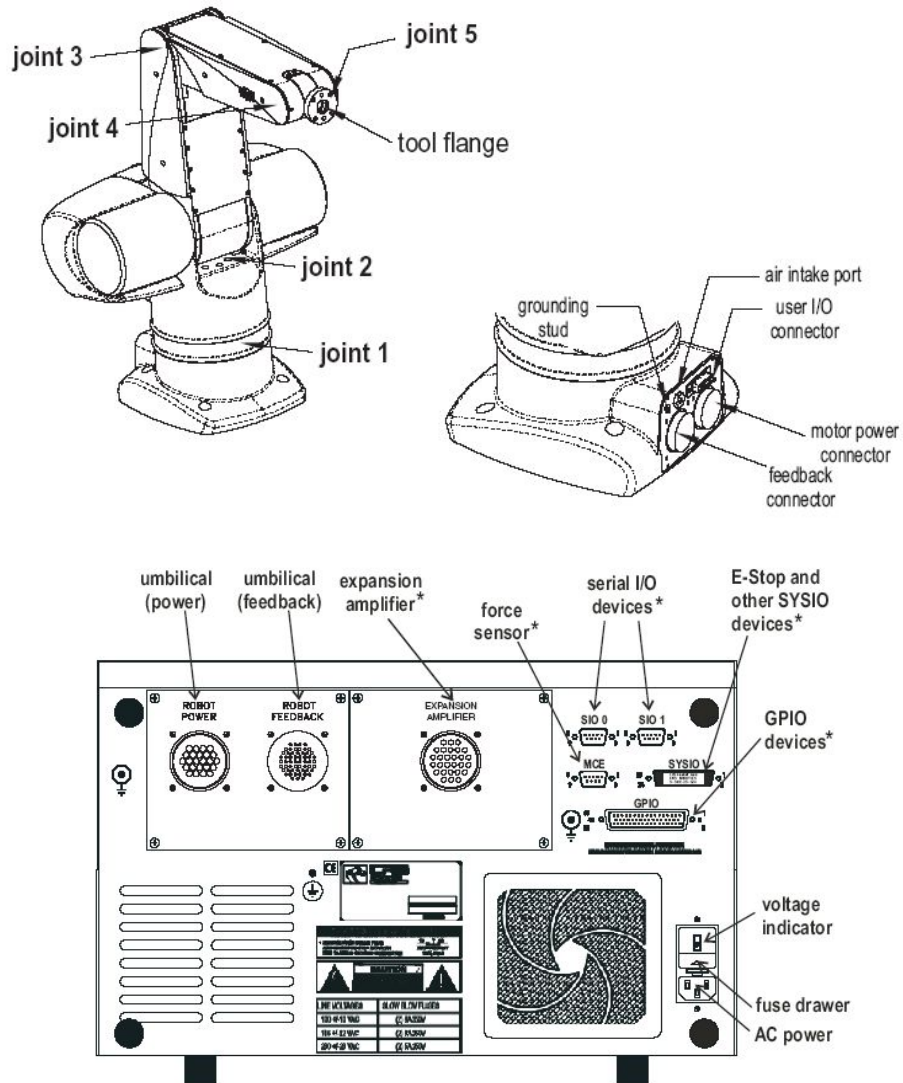


Figura 3.6. Componentes principales del Robot Articulado FMS de UPAEP.

Thermo Electron CRS CataLyst-5 Arm

Number of axes	5
Weight	19 kg [42 lb]
Mounting	Upright or inverted
Nominal payload	1 kg [2.2 lb]
Reach	660 mm [26 in.] (joint 1 axis to gripper fingers)
Repeatability	± 0.05 mm [0.002 in.]
Drive system	DC electromechanical motors Incremental encoders in each joint
Transmission	Harmonic drives
Brakes	Brakes on all joints
Motion modes	Teach Automatic
End-of-arm connections	Servo gripper or air connector on wrist DB-9 connector on wrist

Figura 3.7. Principales características del robot articulado del FMS de UPAEP.



Figura 3.8. Robot y riel en montaje tipo gantry del FMS de UPAEP.

3.1.2. Sistema de transporte

Está compuesta por dos partes de 3 motores que giran en el mismo sentido, conformando un lazo cerrado que pasa por cada una de las estaciones, tienen la capacidad de trasportar un pallet de 200 x 200 mm con la capacidad de mover hasta 5kg de material contenido en este. los responsables del control de los motores son dos variadores MicroMasters 440 que funcionan como esclavos PROFIBUS de un PLC SIEMENES serie 300, que a su vez funciona como controlador de trafico de los pallets y orquestar las ordenes de producción para el resto de las estaciones.



Figura 3.9. Bandas transportadoras y elevadores para estaciones.

3.1.3. Almacén cartesiano

Consta de un manipulador de 2 grados de libertad (eje X y Z) el cual puede alcanzar cualquiera de las 32 bahías de almacenamiento con dimensiones de 200 x 200 x 200 mm, las cuales están restringidas por la forma del pallet que contiene los materiales que son suministrados a el proceso, la distribución de estas bahías puede variar de acuerdo a la programación, pero manteniendo materia prima, producto rechazado y producto terminado. El manipulador es comandado por un controlador 6k2 de PARKER que tiene una alta capacidad de repetitividad y precisión, pero su comunicación está restringida a entradas y salidas digitales, que en su mayoría van a un PLC SIEMENS de la serie 200, el cual recibe la información de que bahías se encuentran ocupadas, y se encarga de transmitirle a el controlador 6k2 la ubicación a donde de a de dirigir, a su vez el PLC comunica a través de un cable PROFIBUS se comunica con el resto del sistema cuando trabaja de manera integrada al resto de las estaciones.



Figura 3.10. Almacén cartesiano de 30 bahías.

3.1.4. Sistema de comunicación y control

La integración del sistema permite el intercambio de señales discretas entre las estaciones y adicionalmente se pueden integrar las estaciones que cuentan con un PLC siemens a través de la red de comunicación de campo llamada PROFIBUS. Ésta red permite la transferencia de datos mediante un protocolo de comunicación homologado a sistemas ISO/OSI teniendo activas la primera, segunda y séptima capa del modelo.

En las figuras 3.11.a y 3.11.b se muestra un esquema de integración entre estaciones. En azul se indican el número de señales discretas de entrada y salida de los PLCs y del controlador de máquinas y robot, mientras que en morado se indica la Red PROFIBUS y los equipos conectados a ella.

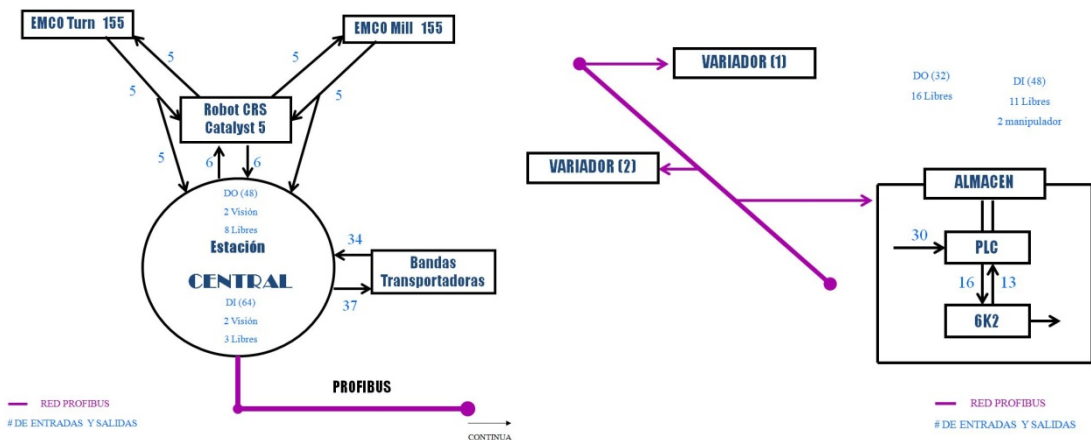


Figura 3.11. Esquema de control de estaciones y transferencia de datos en el FMS de UPAEP

3.2. Modelo Petri del FMS UPAEP.

La representación del FMS de UPAEP que se define a continuación y que es utilizado para el modelo virtual, presenta la arquitectura de control del sistema en la actualidad y la interrelación que existen entre las estaciones.

Los detalles de control están limitados a las características de hardware presentes en el equipo y mencionadas en el capítulo anterior, cuya representación tiene como objetivo identificar y modelar los dispositivos que intervienen en las secuencias de fabricación, transporte y almacenamiento del material. A continuación se presentan los modelos para las estaciones y el sistema total con una secuencia de fabricación de dos piezas en fresadora y en torno.

La figura El modelo del almacén muestra en el P12 la disponibilidad del robot cartesiano y la T15 es el tiempo que le toma colocar un vagón con materia prima en la plataforma 1 de la banda transportadora. Cuando el material procesado regresa al almacén la T16 es el tiempo que le toma al robot colocar el vagón en alguna de las 32 bahías. Una vez terminado el proceso de descarga de las bandas y carga en el almacén el P12 con el Token representa la disponibilidad del robot para realizar otra operación de carga de vagón en las bandas transportadoras.

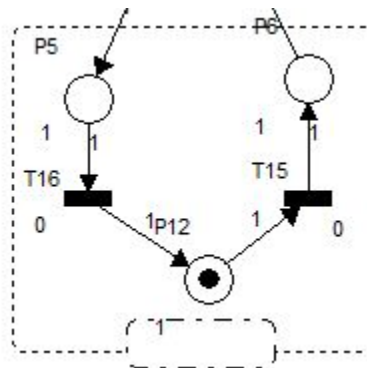


Figura 3.12. Modelo PN para el almacén cartesiano

La figura 3.13 es una representación simplificada de las bandas transportadoras donde T0 es el tiempo que le toma a la plataforma trasladar el vagón a las bandas e iniciar su recorrido hacia la plataforma 2. La T2 representa el tiempo de traslado y llegada a la plataforma 2. De la misma forma al terminar el proceso de fabricación en ambas máquinas y las piezas han sido colocadas en el vagón en la plataforma 2, la T3 y T1 son el tiempo de traslado hacia el almacén para hacer la operación de descarga de bandas y carga en almacén.

Los Places P14 y P13 son la representación de la disponibilidad de las bandas, es decir, que las cadenas de transporte están encendidas y funcionando, que los sensores y plataformas incluidas en las bandas están funcionando correctamente. P3 y P4 al tener token representan el viaje del vagón en las bandas.

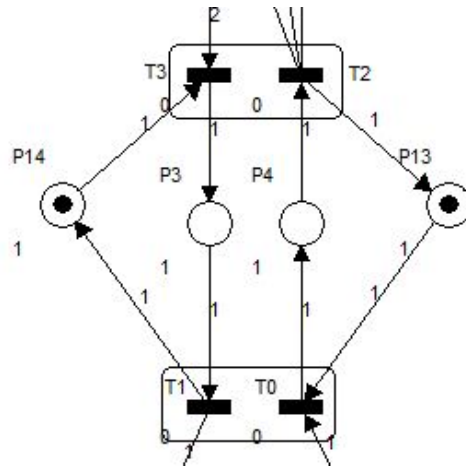


Figura 3.13. Modelo PN para las bandas transportadoras.

La figura 3.13 es la representación de la celda de manufactura que incluye las dos máquinas herramientas CNC y el robot Catalyst y su riel. P8 representa la operación del torno CNC y P7 la operación de la fresadora. P24 y P23 cuando incluyen token indican la disponibilidad de las máquinas, P11 con token representa el robot y su disponibilidad. T11 y T10 son el tiempo para tomar una de las dos piezas de la plataforma 2 donde P30 y P31 representan la sujeción de la pieza por el efector final del robot. P9 y P1 es el robot disponible para moverse una vez sujeta la pieza. T6 y T4 son el tiempo de traslado y carga de la pieza en la máquina. T7 y T5 son el tiempo de maquinado en ambas máquinas.

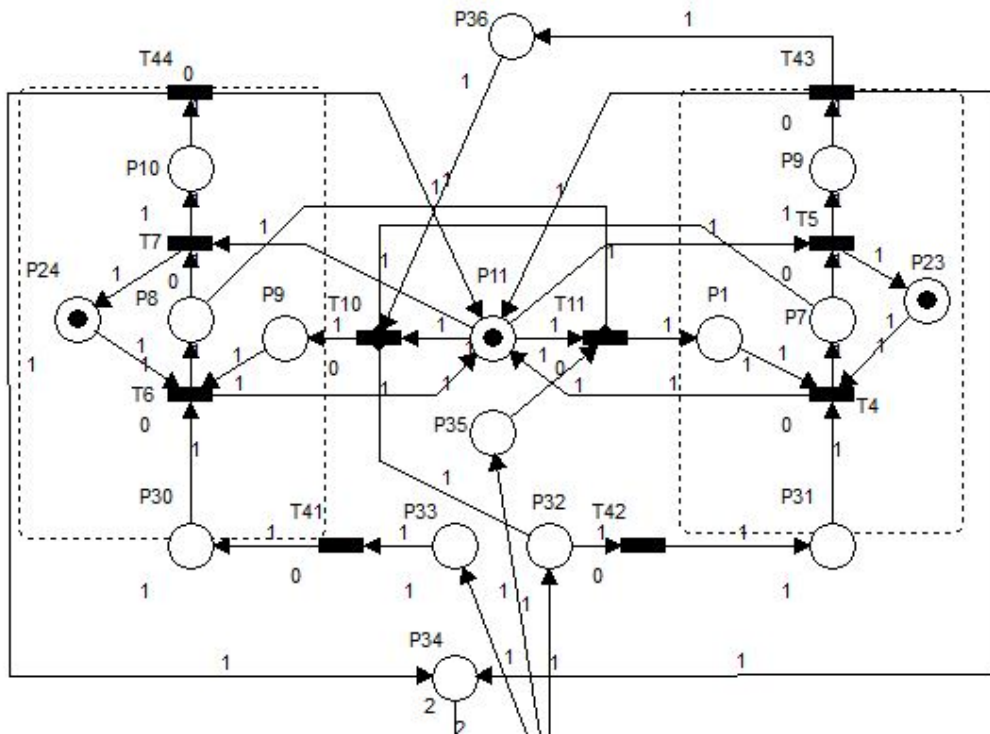


Figura 3.14. Modelo PN para las bandas transportadoras.

P10 y P9 son la representación de las piezas ya maquinadas y descargadas por el robot. T44 y T43 es el tiempo de traslado y colocación en el vagón que está en la plataforma 2. P34 tiene una capacidad de 2 piezas y su arco de salida tiene un peso de 2 lo que representa la carga completa del vagón.

3.2.1. Modelo PN del sistema.

La red PN en la celda de fabricación P33, P32 son la posición de cada una de las piezas en el vagón lo que permite modelar una falla de sujeción ya sea probabilística o determinística. Un token en P35 y P36 representan la prioridad de la carga en máquinas, en el modelo la prioridad de carga es para la máquina fresadora y posteriormente para el torno ya que las operaciones de fresado comúnmente requieren más tiempo que las operaciones de torneado. Los arcos inhibidores que van de P7 a T10 y de P8 a T11 modelan el comportamiento del robot ya que deberá permanecer frente a la máquina hasta que ésta termine la operación. En la figura 3.15 se muestra la res PN del FMS de UPAEP.

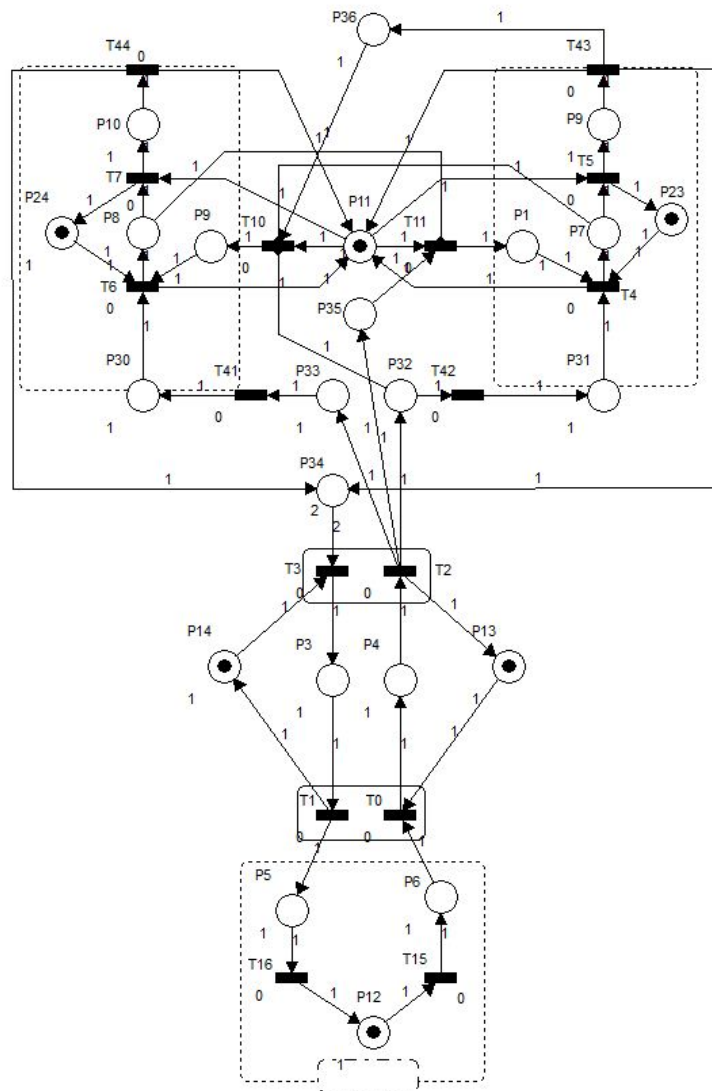


Figura 3.15. Modelo PN del FMS de UPAEP.

3.2.2. Modelo FMS UPAEP

Para validar la secuencia de operación de la Red PN del FMS UPAEP se muestran las secuencias de disparos y las marcaciones obtenidas. La secuencia de marcaciones permite verificar que las propiedades de la red se cumplen y que el modelo se cicla ya que se presenta al final de los disparos la m_0 . En la Figura 3.6 están representadas las marcaciones obtenidas en el modelo y en la tabla 3.1 se muestran las secuencias de las marcas.

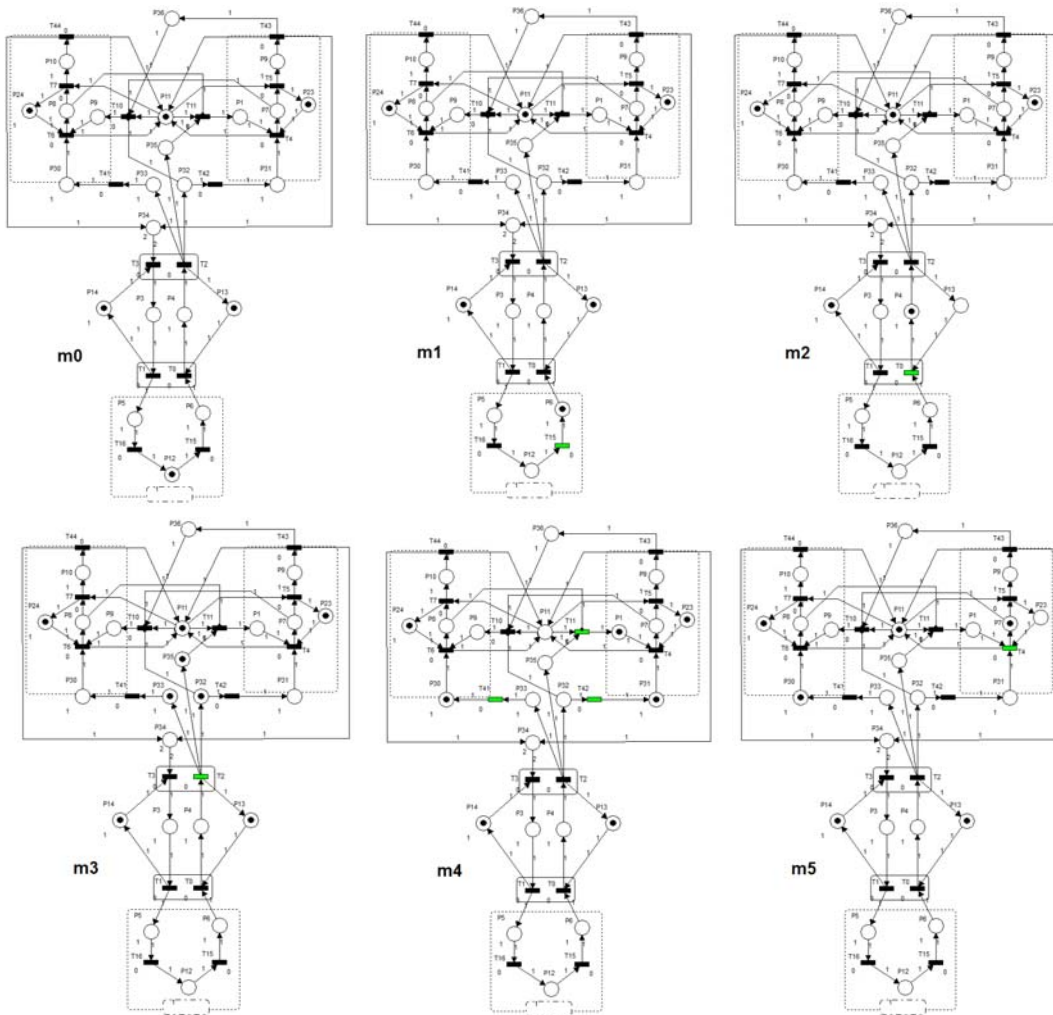


Figura 3.16. Modelo PN del FMS de UPAEP, Secuencia de disparos.

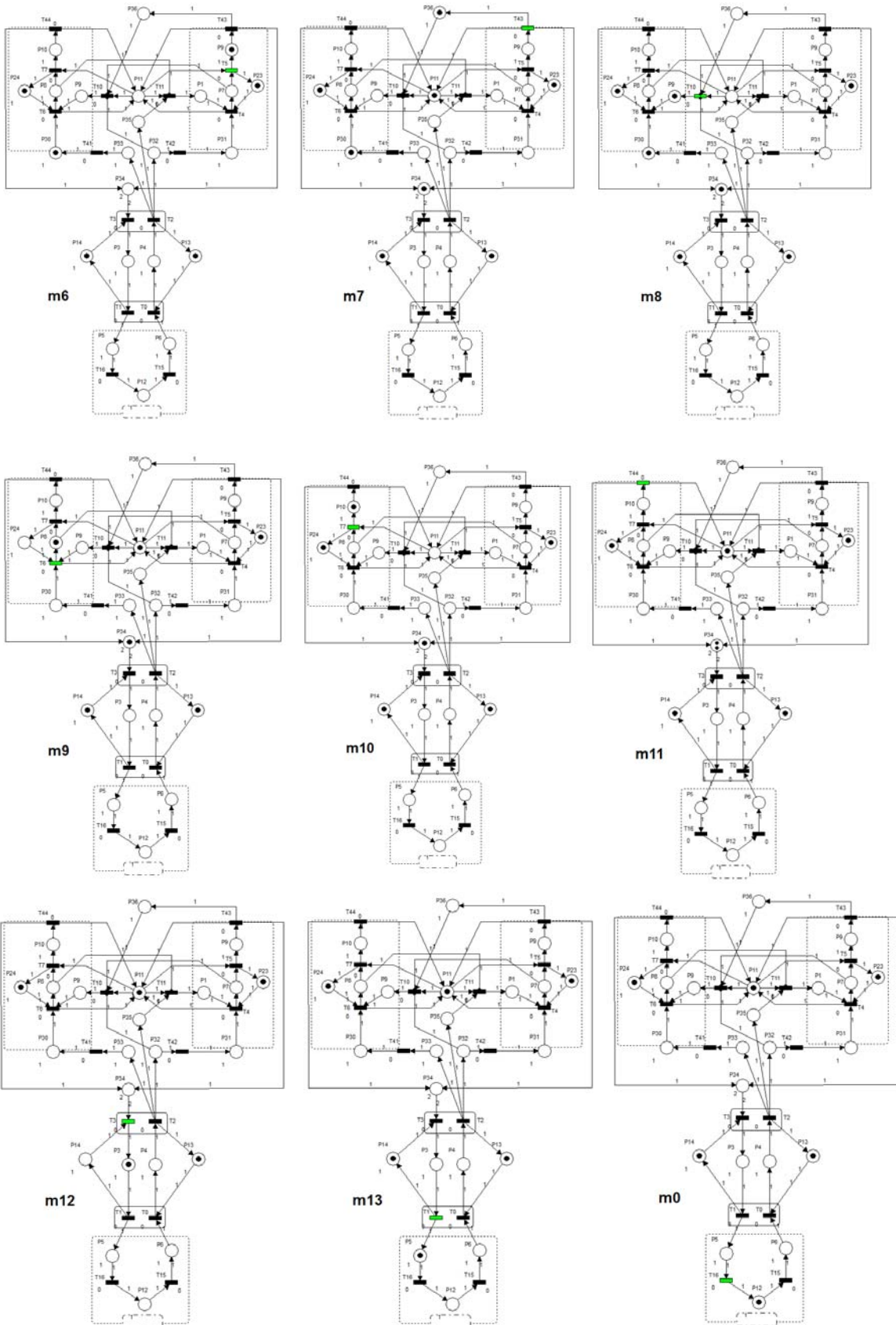


Figura 3.16. Modelo PN del FMS de UPAEP, Secuencia de disparos. Continuación.

Simulation Data generated by HPSim Mar-10-2010 01:29:07;
Marca/ paso;tiempo/ms;P9;P1;P3;P4;P5;P6;P7;P8;P9;P10;P11;P12;P13;P14;P23;P24;P30;P31;P32;P33;P34;P35;P36;
1;0;0;0;0;0;1;0;0;0;1;0;1;1;1;1;0;0;0;0;0;0;
2;0;0;0;0;1;0;0;0;0;0;1;0;0;1;1;1;0;0;0;0;0;0;
3;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;1;0;1;1;1;1;0;0;1;1;0;1;0;
4;0;0;1;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;1;1;1;1;1;0;0;0;0;0;
5;0;0;0;0;0;0;1;0;0;0;1;0;1;1;0;1;1;0;0;0;0;0;0;
6;0;0;0;0;0;0;0;0;1;0;0;0;1;1;1;1;1;0;0;0;0;0;0;
7;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;1;0;1;1;1;1;1;0;0;0;1;0;1;
8;0;1;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;1;1;1;1;1;0;0;0;1;0;0;
9;0;0;0;0;0;0;0;1;0;0;1;0;1;1;1;0;0;0;0;0;1;0;0;
10;0;0;0;0;0;0;0;0;0;1;0;0;1;1;1;1;0;0;0;0;1;0;0;
11;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;1;0;1;1;1;1;0;0;0;0;2;0;0;
12;0;0;0;1;0;0;0;0;0;0;0;1;0;1;0;1;1;0;0;0;0;0;0;
13;0;0;0;0;1;0;0;0;0;0;1;0;1;1;1;1;0;0;0;0;0;0;0;
14;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;1;1;1;1;1;1;0;0;0;0;0;0;

Tabla 3.1. Marcaciones del Modelo PN del FMS de UPAEP.

En la tabla 3.2. se validan las propiedades de la PN del FMS de UPAEP ya que no solo el comportamiento cíclico del modelo debe ser garantizado sino la integridad de los recursos, la ejecución de las operaciones, la creación y almacenamiento de tokens, el flujo y marcas.

Propiedad de las PN	Característica en la PN del FMS de UPAEP
Reachability	Un estado dado puede ser alcanzado desde las condiciones iniciales.
Boundedness	El P34 almacena temporalmente la pieza de una máquina hasta que se deposite la segunda pieza.
Safeness Seguridad	El P24, P23 y P8 son ejemplos de la disponibilidad del recurso y evitando la duplicidad del recurso en el proceso
Conservativeness Conservación	El Token en P11 representa el Robot Catalyst y su disponibilidad. La presencia del Token durante las marcaciones valida su conservación
Liveness Permanencia	Los arcos permiten el viaje de los token sin presentarse bloqueos, y la posición en los places crean operaciones, procesos y actividades en la PN.
Reversability Reversibilidad	Se inicia con la m_0 y se finaliza con m_0
Repetitiveness Repetitividad	Permanencia del estado en las estaciones durante varias marcaciones.
Consistency Consistencia	El P11 desarrolla eventos cíclicos para carga y descarga de material.

Tabla 3.2. Marcaciones del Modelo PN del FMS de UPAEP.

A continuación se presenta el modelo virtual obtenido de la PN y del FMS real de UPAEP con las relaciones entre componentes que actualmente están establecidas entre los dispositivos.

3.3. Modelo Virtual

3.3.1. Creación y representación de dispositivos y estaciones

Para representar con detalle la posición y tamaño de los dispositivos de sujeción en la máquina así como los recorridos entre dispositivos se han dibujado en 3D en CATIA V5 las máquinas CNC. Estas representaciones serán incluidas en QUEST mediante la transferencia de archivos de un formato .catproduct a .vrml que facilita la visualización en la plataforma de simulación así como asegura un menor uso de memoria de gráficos. En la figura 3.17 se muestran los equipos de fabricación en forma virtual.

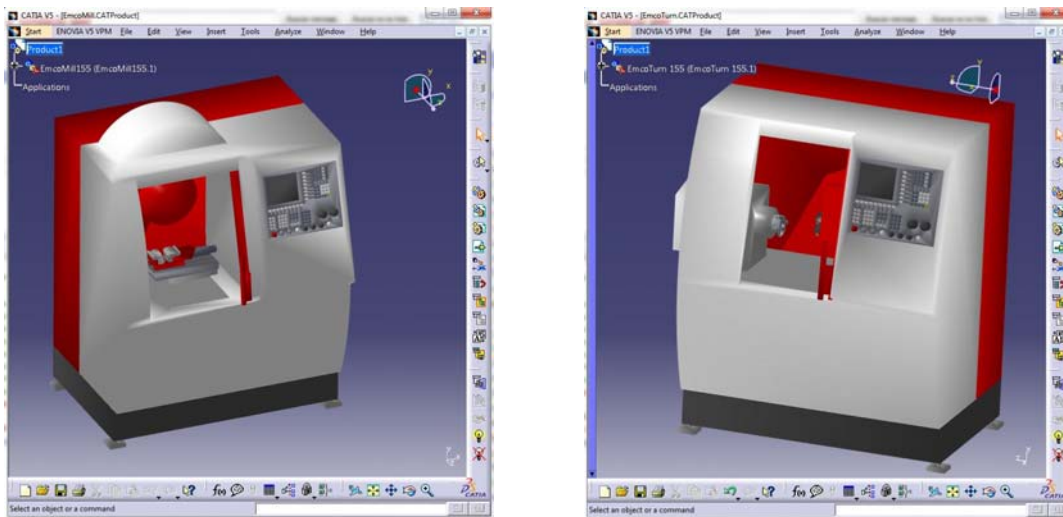


Figura 3.17. Equipos de fabricación virtuales del FMS de UPAEP

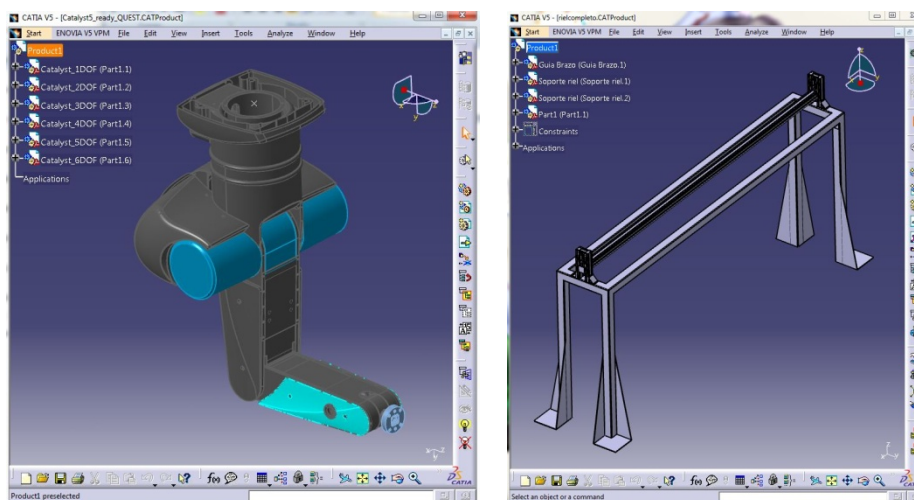


Figura 3.18. Equipo de traslado de materiales en la celda del FMS de UPAEP

El espacio de trabajo del Robot y el riel son definidos por la posición del brazo el cual está instalado con la base invertida o en posición gantry. Ésta posición permite que la carga y descarga de materiales se haga de manera más ágil evitando obstáculos y permitiendo una

mayor velocidad de desplazamiento, sin embargo, si no se controlan la aceleración y desaceleración del riel al llegar a la posición final de su desplazamiento, el robot y la columna que lo une a la estructura del riel actúan como un péndulo oscilando en magnitud relacionada con la velocidad. En la figura 3.18 se muestran los modelos en CATIA® del robot articulado y del riel. Se han dibujado con las especificaciones y dimensiones que tienen en la actualidad y así garantizar las distancias los recorridos y el tiempo.

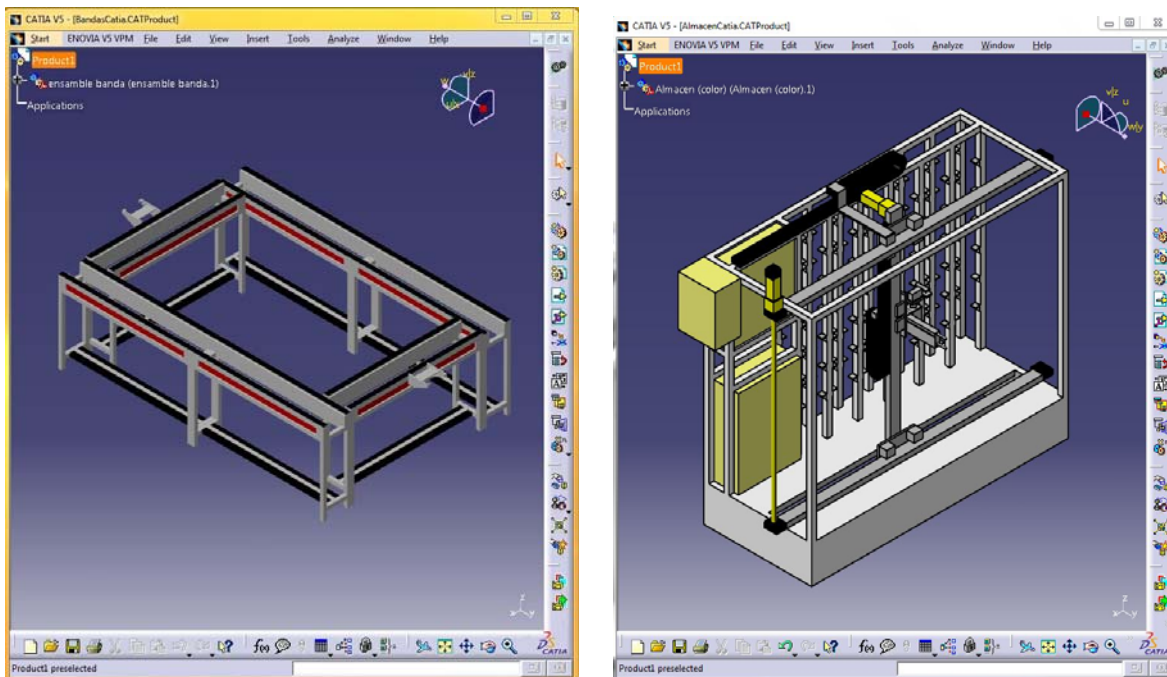


Figura 3.19. Equipo de traslado de materiales en la celda del FMS de UPAEP

El sistema de transporte que une a las estaciones también se dibujó en CATIA® para establecer la distancia y las velocidades de recorrido entre plataformas. El sistema en la actualidad cuenta con cadenas y elevadores que aunque cuenta con dos controles de variación de frecuencia o velocidad, la arquitectura de las bandas y su arreglo actual no permiten el cambio de dirección aunque sí el aumento de velocidad. La velocidad se ve limitada por el sistema de engranes y cadenas así como por los topes de cada posición de estación.

La estación de almacenamiento aunque es programable se limita actualmente a la arquitectura del mismo, es decir, al arreglo matricial de 30 bahías y su desplazamiento en dos ejes y un eje para tomar y dejar piezas. En la figura 3.19 se muestran las imágenes de los modelos 3D de las bandas transportadoras y del almacén.

3.3.2. Productos para la fabricación (CATIA)

En éste estudio se presentan 6 tipos de piezas pertenecientes a 2 familias de partes con geometrías que permiten la utilización de la máxima capacidad de herramientas en las máquinas CNC del FMS UPAEP. Para las piezas torneadas o familia 1 de partes se utiliza un material de aluminio 6061 de $\varnothing 19\text{mm}$ x 100mm y se requiere una serie de operaciones de maquinado en el siguiente orden:

- Debaste exterior (T1)
- Acabado exterior (T2)
- Ranurado (T3)
- Acabado de ranura (T3)
- Tallado de cuerda (T4)
- Guía para taladrado (T5)
- Taladrado (T6)
- Machuelado (T7)

El Torno CNC de la FMS UPAEP cuenta con una torreta de 8 herramientas donde una está destinada para el dispositivo de calibración del cero pieza lo que deja la posibilidad de utilizar para los maquinados 7 herramientas. En éste estudio se utilizará al máximo la capacidad de la máquina para la fabricación de 3 tipos de piezas con geometrías similares. En la figura 3.20 se muestra una de las piezas y sus operaciones de maquinado y en el anexo 1 se muestra el detalle del plan de manufactura de las 3 piezas propuestas para las operaciones de torneado, así mismo se muestra el tiempo total de maquinado de cada uno de ellas.

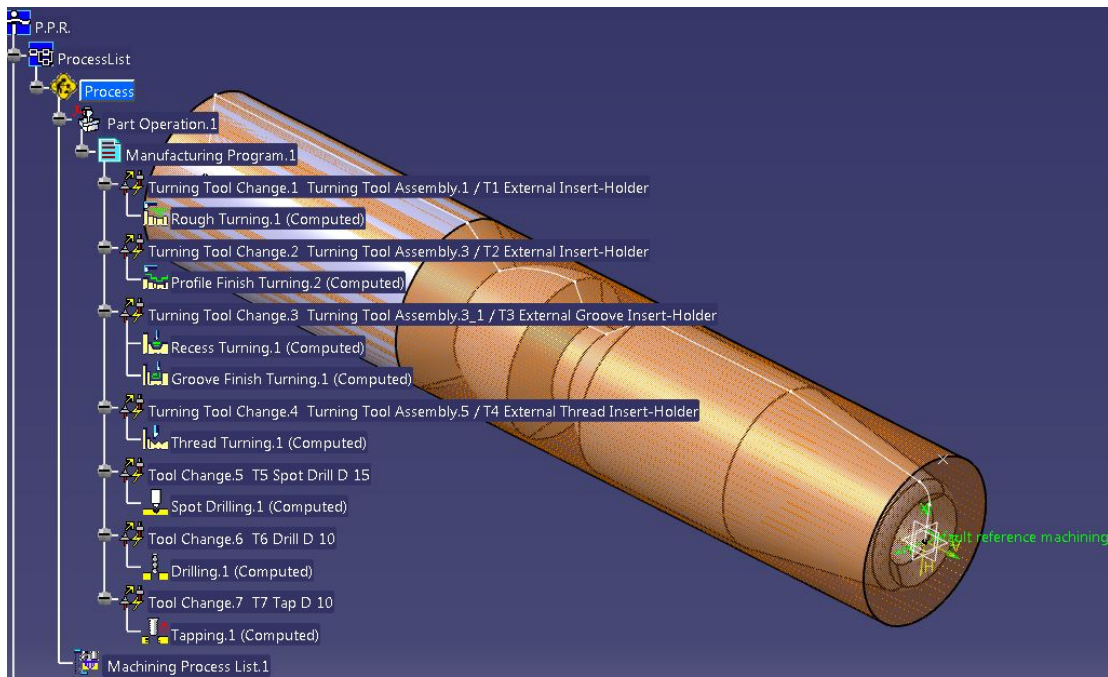


Figura 3.20. Pieza T1_Fam1 y sus operaciones de manufactura en Torno CNC

Las piezas que serán maquinadas en la fresadora CNC tienen un stock de 100mm x 100mm x 20 en aluminio. Las operaciones propuestas permiten la utilización máxima de la torreta de herramientas realizando 9 cambios ya que la torreta tiene asignada una posición de las 10 posibles para una herramienta de calibración. Las operaciones para las 3 piezas para fresado que pertenecen a la Familia 2 son las siguientes:

- Careado o fresado en un plano. (T1)
- Cajeados irregulares y regulares (T2, T3, T6)
- Ranurado y perfilados (T4, T5)
- Centrados para taladrado (T7)
- Taladrados (T8)
- Manchuelados (T9)

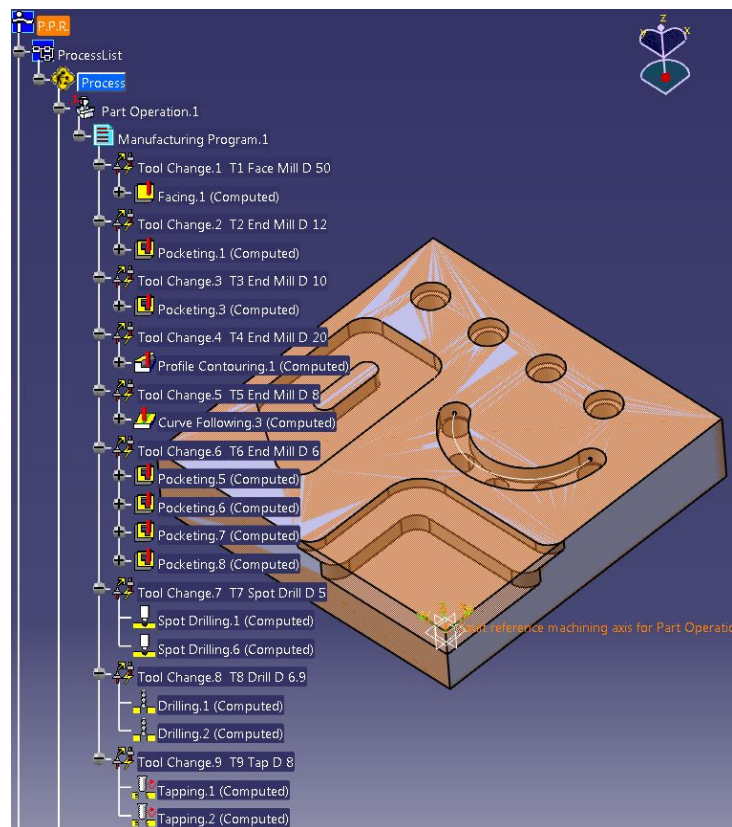


Figura 3.21. Pieza M1_Fam2 y sus operaciones de manufactura en Torno CNC

En la figura 3.21 se muestra el plan de manufactura de la Pieza M1_Fam2 para las operaciones de maquinado en fresadora CNC. Se utilizan 9 herramientas de un total de 10 posibles en la torreta de la fresadora del FMS de UPAEP. En el anexo 2 se muestra el detalle del plan de manufactura de las 3 piezas propuestas para la Familia de partes 2, así mismo se muestra el tiempo total de maquinado de cada una de las piezas.

A continuación se presentan los modelos virtuales para el FMS de UPAEP y los resultados de las corridas de simulación incluyendo condiciones de falla y el resultado del comportamiento del sistema.

Capítulo 4

Simulación de Escenarios del Modelo Virtual

4.1. Modelo actual.

El modelo actual del FMS de UPAEP después de ser representado en una PN como se indicó en el capítulo 3 se ha modelado en QUEST® incluyendo las máquinas y equipos creados en CATIA con la información de tamaños y posición que también se han incluido en las características para la simulación.

La primera representación incluye la creación de la celda con las máquinas y el robot así como la disciplina de fabricación. Para éste propósito se incluyeron los datos de manufactura como una distribución triangular para cada máquina cuyos tiempos son los obtenidos para cada una de las piezas de la Familia 1 y la Familia 2 en los anexos 1 y 2 así como los tiempos de desplazamiento de materiales en las estaciones. Estos tiempos obedecen a la suma de condiciones posibles en la fabricación de las piezas, como se mencionó anteriormente, y aunque pueden existir otras condiciones presentes en familias de partes con menor número de herramientas que disminuyan el tiempo, también podrían existir piezas en otra familia que requiera operaciones de desbaste y acabado de superficies en 3 ejes que requieren un mayor número de pasadas y por consecuencia un aumento considerable de tiempo. De igual forma ocurre con las trayectorias de desplazamiento de materiales ya que podrán existir otras posibilidades aún más cortas o más rápidas.

Por ejemplo, en la fabricación de una superficie cóncava o convexa simple de 100mm x 100mm con un acabado de 0.1 mm de rugosidad se requerirán 1000 pasadas de acabado en una sola dirección y una herramienta de bola de por ejemplo 4 filos y ø6 mm que para aluminio 6061 requiere pasadas de mínimo 100 mm/min. Los datos de corte se obtienen de tablas normalizadas y dependen del tipo de cortador, en el anexo 4 se muestra un ejemplo de datos de corte de un cortador de bola para fabricación en masa. Por las características didácticas de las máquinas las condiciones de corte se ajustan a la operación con máquinas herramientas convencionales más que a las controladas numéricamente. Con lo anterior el tiempo de fabricación se puede calcular de la siguiente forma[41]:

$$RPM = \frac{Vc \times 1000}{\pi D} \rightarrow RPM = \frac{120 \times 1000}{\pi * 6}$$

$$RPM = 6366$$

$$t = \frac{d}{RPM \times avance \times N} \rightarrow t = \frac{100}{6366 \times 0.20 \times 4}$$

$$t = 0.0197 \text{ min por pasada } \text{ ó } 1.182 \text{ seg por pasada}$$

$$t_{\text{total}} = .197 \text{ min} * 1000 = 19.7 \text{ min}$$

Para el tiempo de la operación de acabado en un desplazamiento lineal se deben sumar el tiempo de la operación de desbaste y los movimientos de ubicación por lo que el tiempo total sería aún mayor de 19.7 min. Considerando lo anterior se puede inferir por la flexibilidad de una máquina CNC que pueden existir una gran variedad de familia de partes

y que el tiempo de fabricación está directamente relacionado con la geometría de la pieza así como las tolerancias especificadas.

Con operaciones que requieren mayor tiempo y uso de una sola herramienta las probabilidades de que se interrumpa el proceso de producción son más altas por lo que en caso de éste estudio la familia 1 y 2 han sido propuestos para permitir el cambio constante de herramientas balanceando los tiempos de operación en máquinas.

El desplazamiento del robot y los movimientos de carga y descarga se consideraron también con una distribución triangular debido a su repetitividad y ruta fija ya que el arreglo y posición de la plataforma y de los sistemas de sujeción en las máquinas no presentan cambios de posición durante la simulación. En la tabla 4.1. se presentan los tiempos de desplazamiento y las operaciones de carga y descarga para las máquinas y desde la plataforma 2.

Parámetro	De Plat2 al Torno	Del Tono a Plat2	De Plat2 a Fresa.	De Fresa. a Plat 2	Total Carga	Total Descarga
Velocidad 20%	66 seg	66 seg	102 seg	102 seg	168 seg	168 seg
Velocidad 50%	44 seg	44 seg	32 seg	32 seg	76 seg	76 seg
Velocidad 80%	40 seg	40 seg	25 seg	25 seg	65 seg	65 seg

Tabla 4.1. Tiempos de desplazamiento y desviaciones en la posición frente a la plataforma 2.

Los tiempos de carga y descarga son iguales ya que se consideran los mismos puntos de entrada a la máquina para realizar los trayectos de salida. No se hacen consideraciones para el retiro de las piezas una vez fabricadas ya que la geometría final obtenida cambia con cada familia de partes.

La velocidad de desplazamiento del robot en sus articulaciones es de 2 m/s y es similar en su eje adicional. El límite de velocidad programada en el eje 6 es de $80\% \pm 5\%$ ya que sobrepasado éste límite el pandeo y desgaste que presenta al acelerar y desacelerar mandan a emergencia a la articulación ocasionando un paro de emergencia.

De igual forma el transporte de las piezas a máxima velocidad hace que la sujeción en la plataforma 2 tenga un desplazamiento de mayor al de 0.05mm indicado como nominal en la repetitividad de los desplazamientos. Lo anterior se compensa con la holgura o juego que presentan los soportes de sujeción de las piezas mostradas en el anexo 6. En las imágenes se observa el espacio disponible para el acomodo de las piezas así como los sistemas de sujeción y las condiciones durante la operación. Estas diferencias crean eventos que sumados ocasionan fallas en la posición de la pieza.

El tiempo de carga y descarga de piezas también depende del número de posiciones lineales o interpoladas que el robot debe realizar y debido a la flexibilidad de programación se pueden ejecutar trayectorias suavizadas o simplificadas para llegar a la meta de carga o

descarga. En éste estudio se emplean trayectorias punto a punto según coordenadas utilizando el comando *move()* que permite al algoritmo de desplazamientos del brazo encontrar la trayectoria más ágil para el brazo, a diferencia del comando *moves()* que obliga al control a trazar una trayectoria lineal en cada movimiento.

Las bandas transportadoras tienen un control de velocidad por sección. Estos controladores permiten el aumento de la frecuencia de entrada (Hz) a los motores incrementando o disminuyendo las RPM de los mismos. Las velocidades baja, media y alta que se presentan en la tabla 4.2. y son resultado del cambio de Hz y de la máxima velocidad soportada por las cadenas antes de una falla como se muestra en la figura 4.1 debido al esfuerzo y desgaste observado al aumentar la velocidad.

Bandas Secuencia	BAJO (SEG)	MEDIA (SEG)	ALTO (SEG)
Almacen-Celda	37.41	25.85	17.7
	37.13	25.74	16.6
	37.08	25.93	17.8
promedio	37.21	25.84	17.37
Velocidad del vagón mm/seg	0.00	0.00	0.00
Celda-Almacén	36.65	24.48	16
	36.7	24.11	16.5
	36.89	24.55	16.41
promedio	36.75	24.38	16.30
Velocidad del vagón mm/seg	0.00	0.00	0.00
Tiempo plataforma 1	10.35	10.35	10.35
Tiempo plataforma 2			

Tabla 4.2. Tiempos de desplazamiento y velocidades según distancia recorrida en las bandas transportadoras.

Además, cada vagón al llegar a una estación o esquina de la banda se detiene mediante un tope de aluminio que es activado por un sensor previo a la plataforma de transferencia. A la máxima velocidad el vagón pega con tal fuerza en el tope que rebota y es proyectado en dirección contraria varias veces hasta que pierde inercia. Ésta condición también propicia el desajuste de las piezas transportadas en los vagones. Aunque la velocidad de las cadenas puede ser controlada a través de PROFIBUS y SIMATIC la distribución de las cadenas y el desplazamiento libre de los vagones sobre ellas imposibilita el control total del vagón sobre las bandas restando flexibilidad de ruta y de manejo de materiales.



Figura 4.1. Rompimiento de cadenas por esfuerzos a máxima velocidad en bandas.

En el sistema de almacenamiento se consideran los desplazamientos a baja, media y alta velocidad del brazo ya que el sistema de actuación y control presenta un nivel alto de flexibilidad debido a la programación de los servo motores que controlan la posición del brazo neumático.

Los desplazamientos pueden ser programados para que el control calcule la trayectoria óptima hacia cada objetivo logrando una disminución de tiempo de trayecto. Sin embargo, la programación básica permite que el brazo alcance cualquiera de las 30 bahías desplazando de forma independiente cada uno de los ejes haciendo que en ocasiones dependiendo de la bahía uno de los ejes se detenga primero que el otro al llegar al objetivo.

La precisión del brazo es también muy elevada ya que permite la ubicación del brazo en pulsos de motor logrando desplazamientos de hasta 1 mm por cada 1200 pulsos. Sin embargo la ubicación de las bahías es fija y los espacios entre ellas permiten variaciones en la posición al colocarlas en el robot.

Adicionalmente el brazo y su sistema de sujeción o gripper permiten el acomodo del vagón mediante dispositivos de ubicación o fixture (Anexo 6). En la tabla 4.3 y 4.4 se muestran los tiempos de desplazamiento a cada bahía en las tres velocidades propuestas para el almacén en éste estudio.

Tiempo en segundos del desplazamiento del Brazo Neumático para cargar tomar y dejar vagones en las bahías del almacén.		
17.6	13.52	9.81
7.94	13.92	9.53
18.11	13.81	9.63
17.45	13.6	9.51
17.63	13.26	9.28
Promedio	Promedio	Promedio
15.746	13.622	9.552
Baja	Media	Alta

Tabla 4.3. Tiempos de carga y descarga de vagones de las bahías del almacén.

	Columnas					Filas
	5	4	3	2	1	
Baja	10.75	7.8	6.28	6.36	6.38	1
Media	3	2.19	2.03	1.96	2.03	
Alta	1.85	1.38	1.3	1.46	2.55	
Baja	10.6	7.59	4.1	3.6	4	2
Media	2.36	1.89	1.34	1.18	1.34	
Alta	1.8	1.42	1.111	1.11	1.15	
Baja	10.41	7.53	4.3	0	4.47	3
Media	2.87	2.04	1.47	0	1.46	
Alta	1.51	1.51	1.04	0	1.2	
Baja	10.61	7.47	4.33	3.43	4.12	4
Media	2.44	2.21	1.62	1.55	1.48	
Alta	1.52	1.31	0.64	1	0.88	
Baja	11	7.57	5.97	6	6	5
Media	2.63	2.33	1.95	1.98	1.91	
Alta	1.8	1.3	1.23	1.33	1.27	
Baja	10.6	7.77	8.62	9	8.97	6
Media	2.59	2.61	2.53	2.39	2.21	
Alta	1.61	1.36	1.73	1.88	1.8	

Tabla 4.4. Tiempos de desplazamiento en el almacén cartesiano del FMS de UPAEP.

4.2. Representación del Modelo

El modelo de la celda de fabricación en QUEST® se muestra en la figura 4.2. y las condiciones de operación de obedecen a la programación establecida por el fabricante.



Figura 4.2. Celda de fabricación representada en QUEST®.

Aunque los dispositivos fueron creados en CATIA® es necesario transformarlos a un formato genérico como iges o step para insertarlo en el ambiente QUEST®. En la figura 4.1 se muestran dos máquinas, un AGV, dispositivos auxiliares y una banda transportadora. A cada máquina se le ha asignado desde las propiedades de la entidad valores determinísticos o probabilísticos para la ejecución de la tarea. En la figura 4.3. se muestra un ejemplo para la operación del Torno CNC.

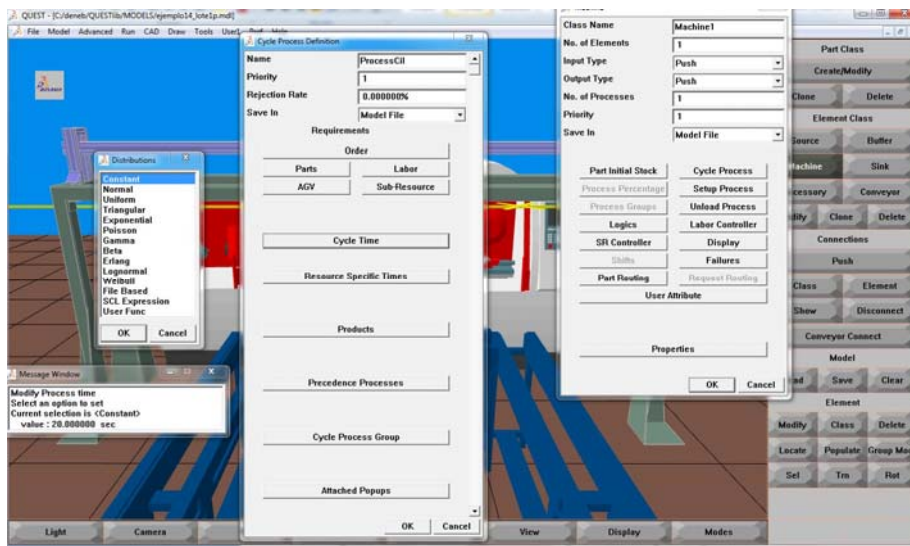


Figura 4.3. Definición del tiempo de fabricación en el Torno.

El robot con riel se define como un dispositivo AGV en QUEST® ya que el desplazamiento sobre el riel se determina mediante velocidad, aceleración y desaceleración. Estos parámetros se establecen en las propiedades del AGV, así mismo se establecen los puntos de carga y descarga de piezas que definen las distancias y el tiempo de recorrido. En la figura 4.4 se muestran los parámetros establecidos para el AGV o robot gantry del FMS según las velocidades definidas en la tabla 4.1.

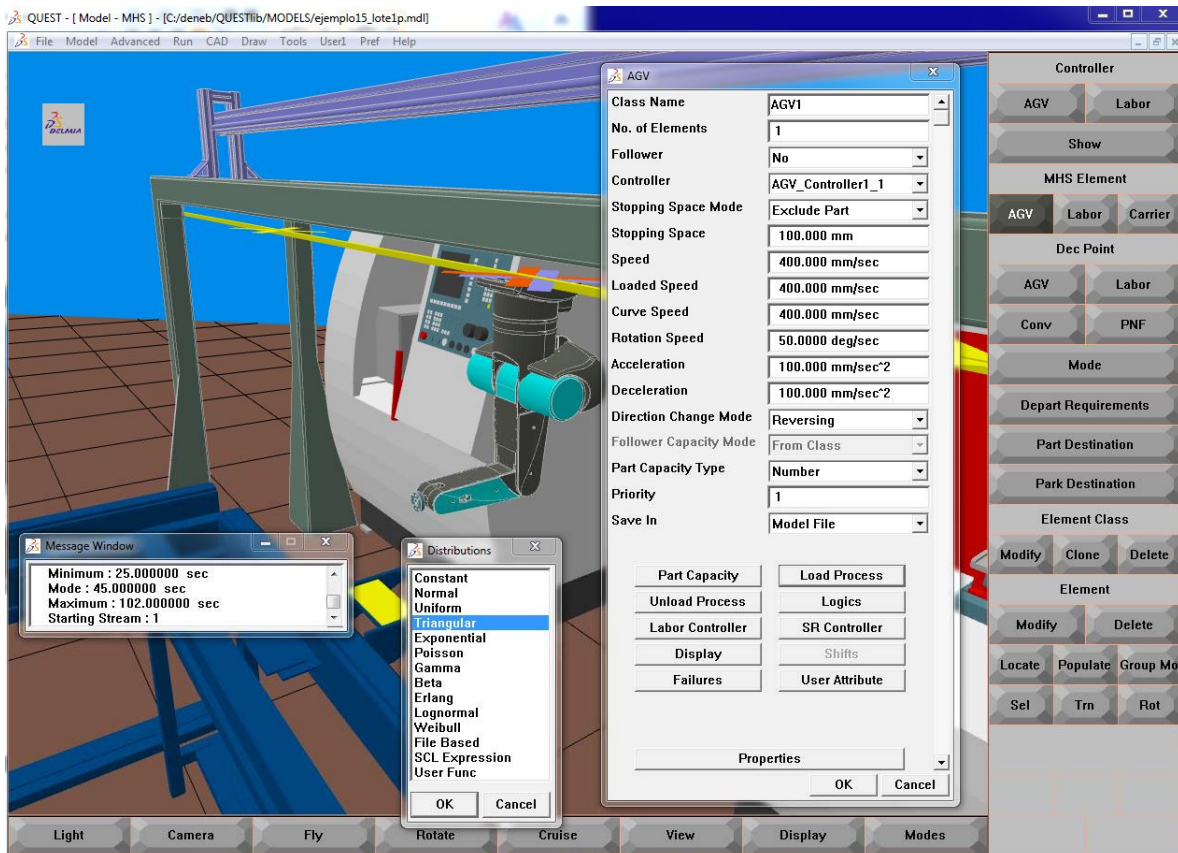


Figura 4.3. Definición de las características de operación del Robot Gantry.

Las bandas transportadoras definen el trayecto de los vagones y la velocidad de llegada entre plataformas. Se definen la dirección y orientación de los vagones sobre las bandas mediante puntos de cambio que se ubican mediante coordenadas definiendo con precisión el comportamiento del vagón sobre las bandas. En la figura 4.4. Se muestran las propiedades de las bandas y el trayecto definido sobre la representación de las bandas. La velocidad establecida corresponde a los datos obtenidos en la tabla 4.2.

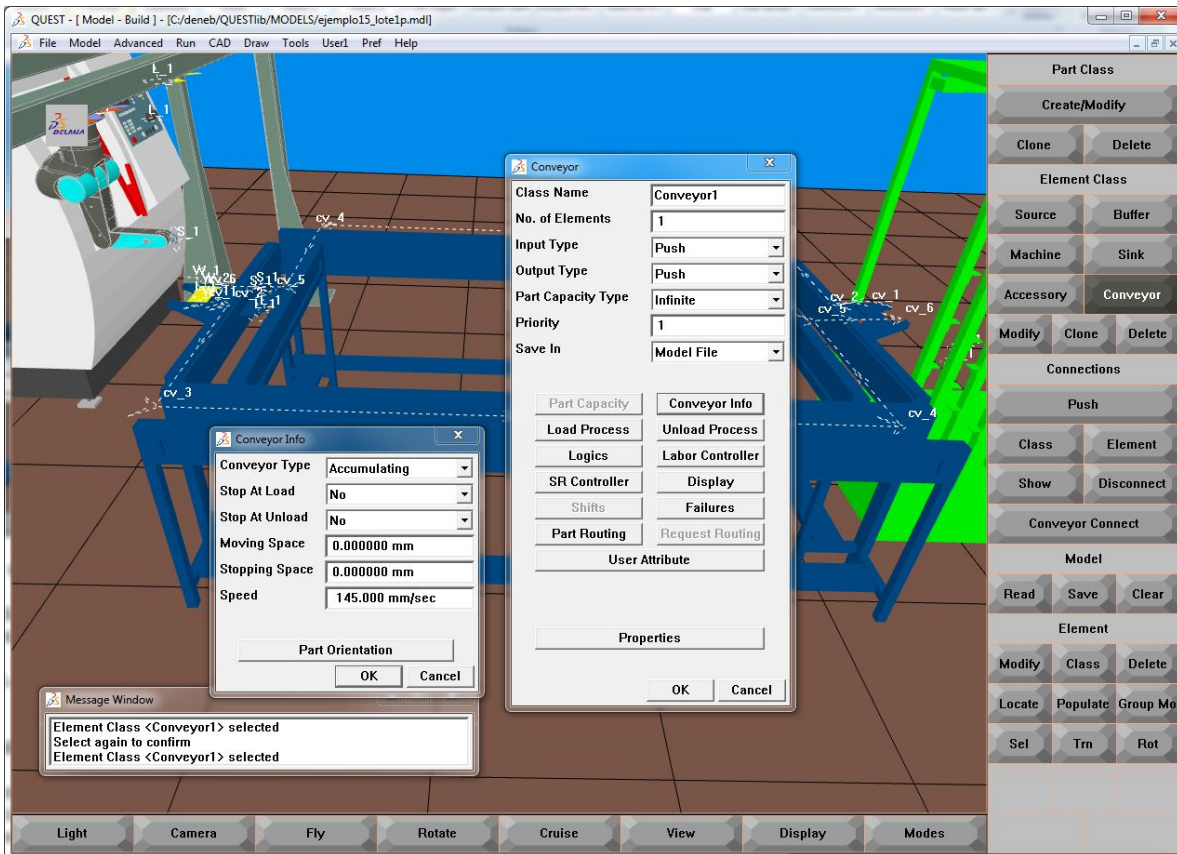


Figura 4.3. Definición de características y rutas para las bandas transportadoras.

En el almacén se crean y empaquetan entidades las cuales son desempaquetadas en la plataforma 2 para procesarlas de manera independiente en cada una de las máquinas. Éste proceso de empaquetamiento incluye al vagón, la pieza cilíndrica y la pieza prismática. Los tiempos de desplazamiento a las bahías se mostraron en la tabla 4.1 y se incluyeron en las características del modelo en la figura 4.5. También existe un proceso de desempaque en el almacén que permite la separación del vagón y las piezas ya que en la plataforma 2 fueron empaquetadas después de realizar el procesamiento en las máquinas. Para lograr éste se crean los procesos de empaque y desempaque indicando que entidades se verán afectadas y cuál será el resultado del proceso (figura 4.4).

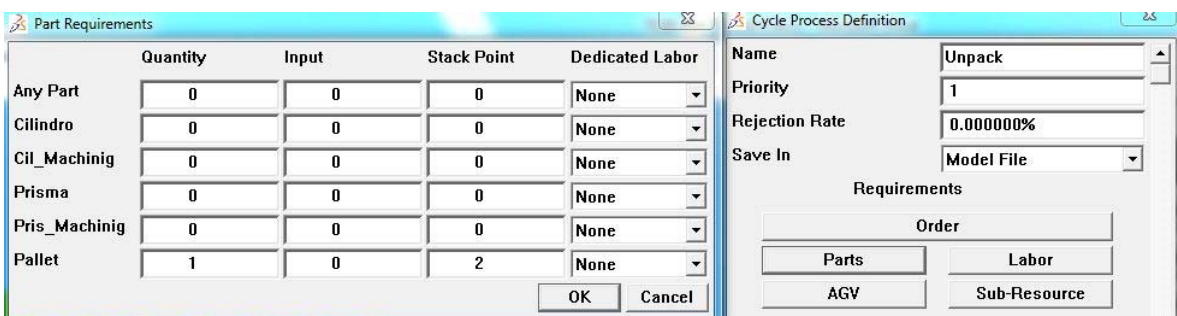


Figura 4.4. Proceso de desempaketado de entidades para transporte en bandas.

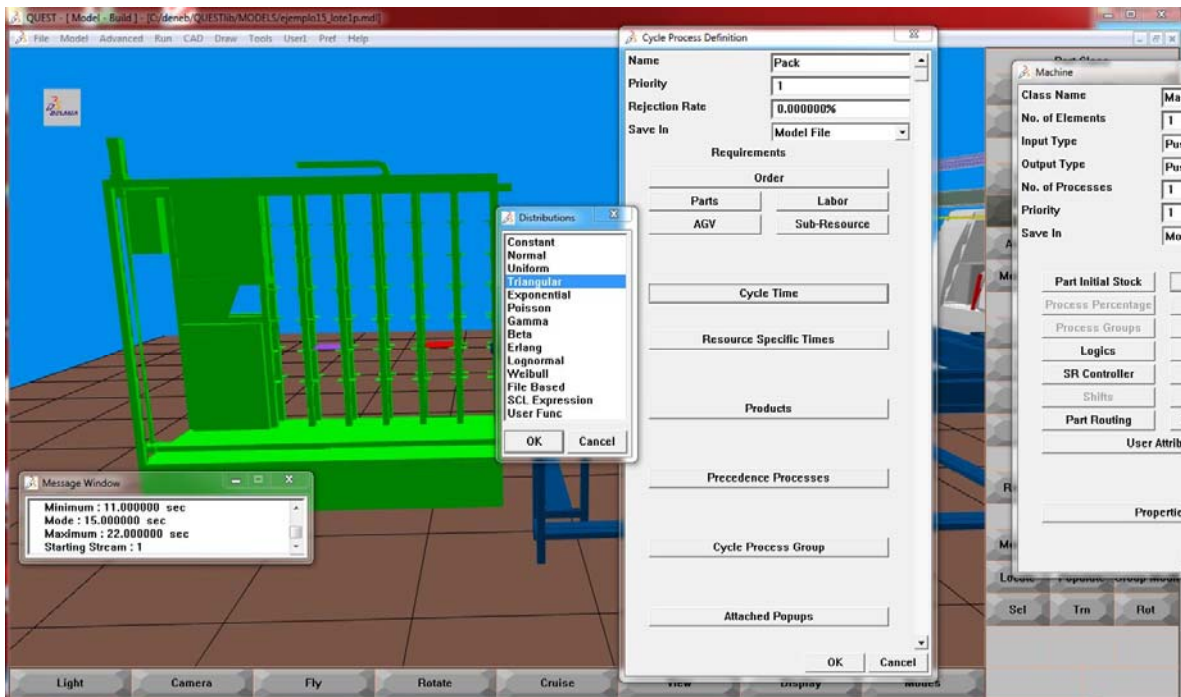


Figura 4.5. Tiempo de traslado y empaquetado para colocar en bandas.

La conexión entre estaciones determina el flujo de los materiales y la activación de los procesos de fabricación así como las posibles secuencias de fabricación del sistema. En la figura 4.6 se muestran las conexiones entre estaciones que para el sistema FMS de UPAEP representa una señal de entrada o salida discreta para el inicio de los procesos.

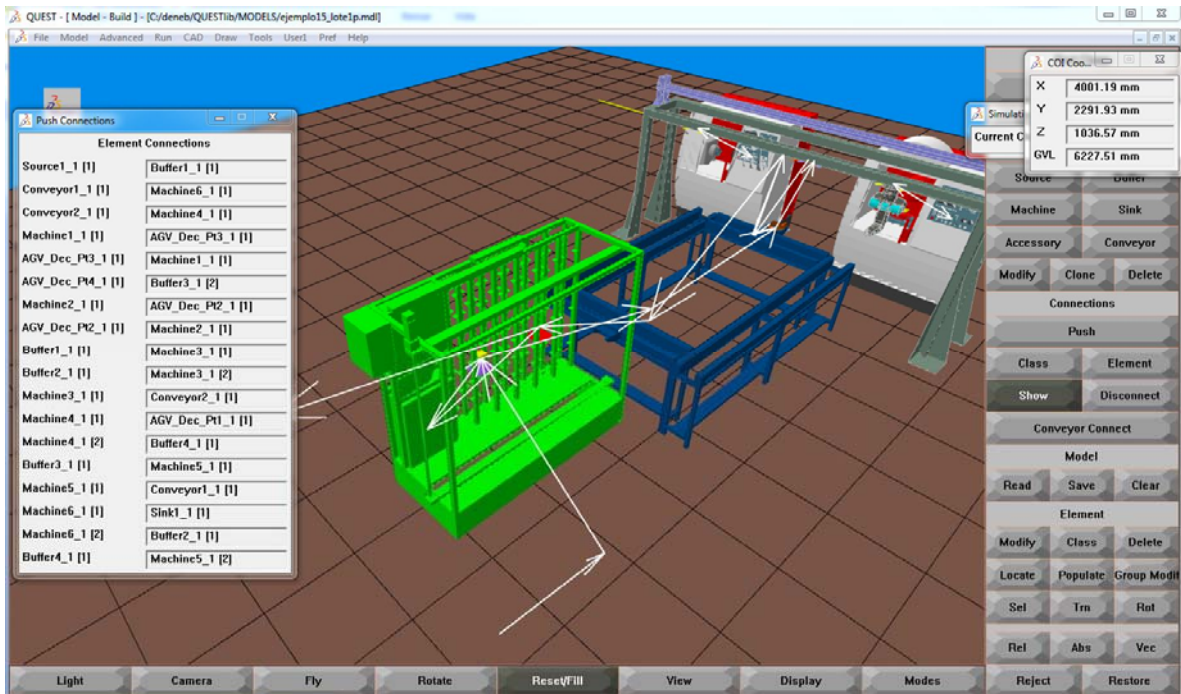


Figura 4.6. Conexión entre estaciones para el flujo y secuencia de operaciones.

4.2.1. Obtención de resultados

Para obtener los resultados se realiza una corrida de 8 horas ó 28800 segundos similares a un turno normal de trabajo. El comportamiento del sistema o la secuencia de tareas es para una operación de lote único, es decir, se envía un lote con las piezas para torneado y fresado y al finalizar los procesos de maquinado se devuelven al almacén como productos terminados. Después de terminado el primer lote se envía el segundo para su procesamiento. Lo anterior obedece a que la baja flexibilidad que otorgan las bandas transportadoras del FMS de UPAEP no permite el control o monitoreo de la familia o pieza que se va a procesar. Adicionalmente el bajo nivel de integración mostrado en la figura 3.11 no permite el control de asignación de programa en las máquinas CNC, es decir, con el hardware actual no es posible una operación de control numérico distribuido (DNC).

Con lo anterior, la secuencia y el tiempo de envío de materiales desde el almacén a la celda de fabricación es siempre la misma simplificando las operaciones de control en el traslado de materiales. Los resultados de la utilización de los equipos sin fallas se presentan en la figura 4.7.

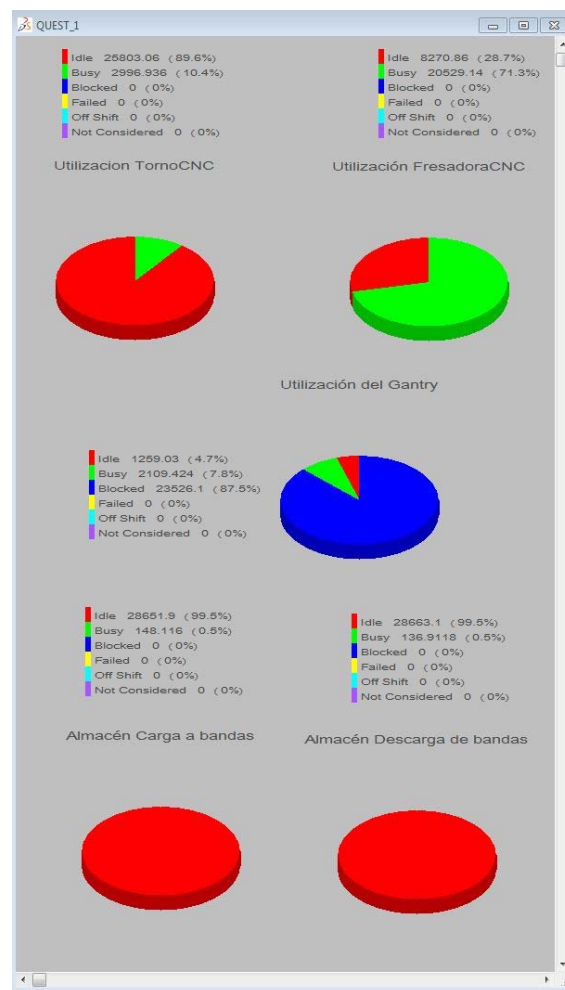


Figura 4.7. Porcentajes de utilización de los equipos en 8 horas de fabricación sin fallas.

En la figura 4.7 se observa que según los tiempos de fabricación el Torno CNC tienen una utilización del 10.4% para la familia de partes 1 mientras que la Fresadora CNC tiene un porcentaje de utilización del 71.3% para la familia de partes 2, lo que cuantifica la diferencia entre los procesos de fabricación y el desbalance entre éstas dos estaciones de fabricación que por sus mismas características de funcionamiento no pueden alcanzar un nivel homogéneo de utilización.

En la misma figura se observa que el Robot Gantry tiene una utilización del 7.8% de las 8 horas y 4.7% de desocupación. Sin embargo, por la configuración de lote único y el envío de las dos piezas por vagón así como la espera frente a máquina mientras finaliza el proceso de fabricación en cualquier máquina hace que se presente un bloqueo del equipo de 87.5%.

La utilización del almacén en la operación de carga y descarga de y hacia las bandas es de 1% nuevamente debido a la velocidad y flexibilidad del equipo haciendo mínima la intervención del almacén en las secuencias de fabricación.

En el anexo 7 se muestra el resumen de la corrida del sistema sin la presencia de fallas indicando una fabricación de 8 piezas y 4 asignadas y en fabricación. Lo anterior también puede verse en el modelo 3D al final de la corrida donde se aprecian las piezas una en la fresadora y otra en la plataforma. En la figura 4.8. se muestra el modelo al finalizar las 8 horas de la corrida así como el resumen de los datos obtenidos para la Fresadora CNC (Machine1_1).



Figura 4.8. Resumen de datos al final de la corrida con fallas programadas con distribución de probabilidad y el estado obtenido para la fresadora CNC.

A continuación se presenta el modelo con fallas probabilísticas y los resultados obtenidos en una corrida de 8 horas.

4.3. Modelo propuesto A. Fallas probabilísticas programadas.

En éste modelo se representa la acción cambio de herramienta o ajuste de sistema de sujeción presentado con una frecuencia que obedece a una distribución exponencial, Law [42], con media de 3600 segundos y un tiempo de cambio o ajuste con una distribución normal con media de 300 segundos y una desviación estándar de 180 segundos relacionados directamente con el tipo de sistema de sujeción de las herramientas y el tipo de montaje. Lo mismo ha sido establecido para los cambios de herramienta previos al rompimiento, al alcanzar el tiempo de vida por cálculo de recorrido de corte, o al desajuste del sistema de sujeción. Los datos propuestos para la ocurrencia de la falla o cambio programado de herramienta tienen una distribución exponencial de media 1500 segundos y un tiempo de cambio de distribución normal con media de 360 segundos y desviación estándar de 120 segundos.

De igual forma se modela la falla en el Robot Gantry con una distribución exponencial con media de 360 segundos y un tiempo de reparación o ajuste de distribución normal con medios 180 segundos y desviación estándar de 60 segundos para efectos del modelado. En el almacén la ocurrencia de fallas obedecen a una distribución exponencial con media de 9000 segundos y tiempos de mantenimiento o ajuste de distribución normal con media de 180 segundos y desviación estándar de 60 segundos.

Los datos son representaciones para el modelo obtenidas mediante la fabricación de series de dos tipos de piezas y en un tiempo limitado de fabricación menor al planteado para la simulación ya que debido a la naturaleza didáctica del sistema y a las limitantes en herramientas disponibles en máquinas y al programa de control actual no se cuentan con los datos de fabricación para más de 8 horas de trabajo continuo y que además están fuera del alcance del objetivo en éste proyecto.

4.3.1. Representación del Modelo

En la figura 4.9 se representa el modelo del FMS de UPAEP con las fallas programadas o actividades de mantenimiento y ajuste para los principales componentes del sistema. La disponibilidad de la fresadora CNC está modelada por el place P23 y la transición T54 elimina dicha disponibilidad representando una falla después de ocurrido cierto tiempo. P39 representa el estado de reparación o ajuste del equipo en el tiempo T46 antes de volver a obtener el estado de disponibilidad de la máquina.

De la misma forma se modelan las fallas programadas para el Torno, el Robot Gantry, las bandas y el almacén. Algunas fallas programadas o mantenimiento previo evitando daños a componentes o equipos pueden hacerse directamente en la estación mediante la programación de la estación o al establecer los parámetros de falla solicitados como por ejemplo el conteo del tiempo de vida de las herramientas. Sin embargo, existen otras fallas que ocurren de manera local y son resultado de condiciones aleatorias difíciles de programar o pronosticar sin el constante monitoreo y la acumulación de datos e

información del comportamiento del sistema en ocasiones similares que llevaron a la aparición de una falla. En el modelo ya mencionado y en el sistema real no existe arquitectura de control o diseño de secuencia de programación que retroalimiente a las estaciones sobre la posible ocurrencia de una falla o los procedimientos de acción para lograr superar dicha condición lo más fácil y rápido posible.

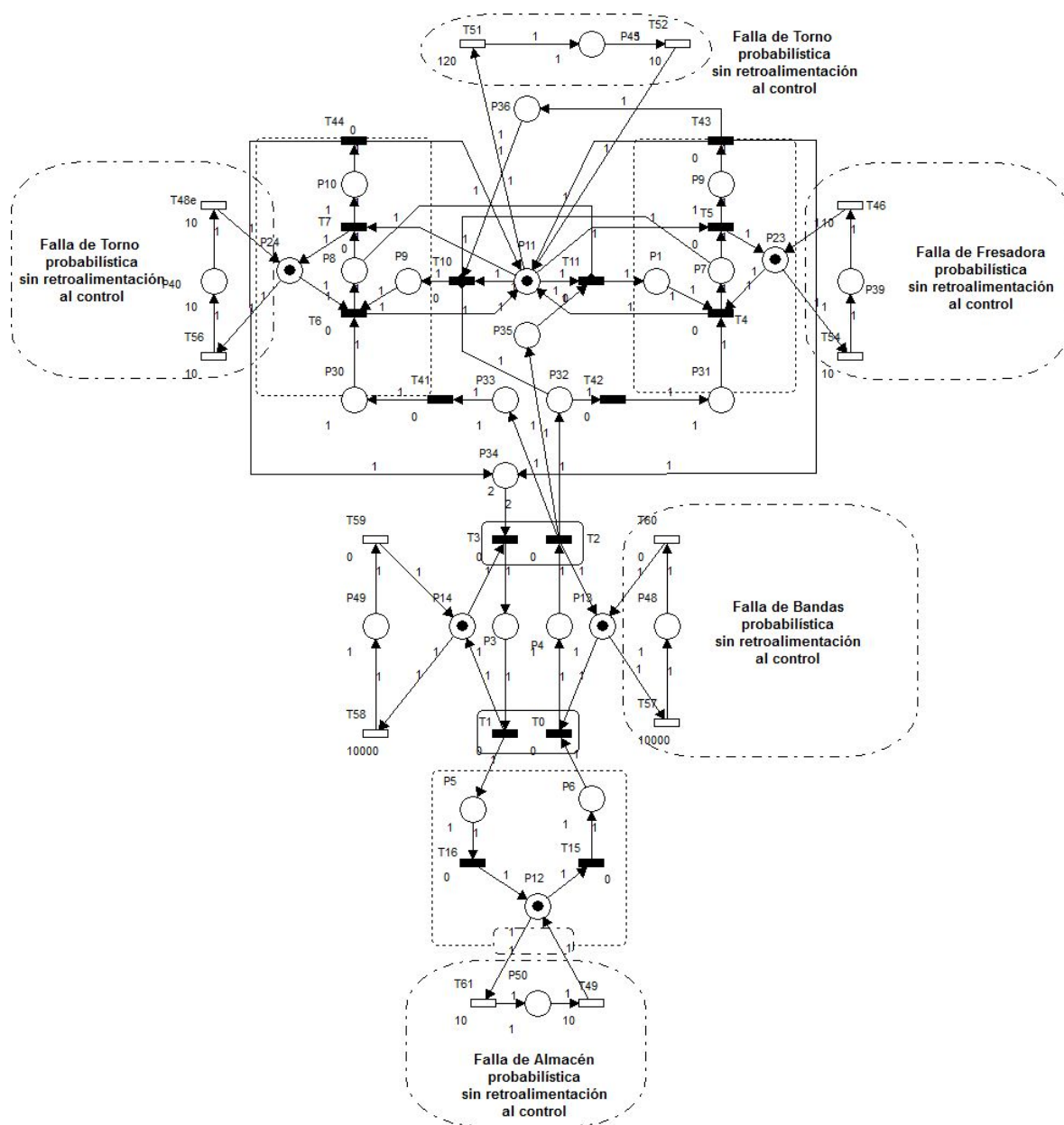


Figura 4.9. PN del FMS de UPAEP con modelado de fallas programadas con distribuciones de probabilidad.

Las fallas indicadas en el modelo PN son representadas mediante Fallas en el modelo de QUEST® y se establecen las condiciones de ocurrencias así como el tiempo necesario para el restablecimiento de la condición estable.

4.3.2. Obtención de resultados

En la figura 4.10 se muestran las estadísticas del sistema al ejecutar operaciones por 8 horas y con la asignación de fallas programadas para las estaciones. Se observa que existe una reducción en el tiempo de desocupación de la máquina pero de una reducción del 15.4% en el tiempo de ocupación o fabricación de la máquina ya que se ha destinado a las operaciones de fallas programadas. Dicho porcentaje de disminución obviamente afecta el resultado de la fabricación final como se muestra en el anexo 8 y en la imagen 4.11 donde las piezas obtenidas por la máquina se redujeron de 8 a 6. El mismo comportamiento se observa en las demás estaciones sin embargo no hay que olvidar que éstas condiciones del sistema lo acercan más a la realidad e operación que está siempre sujeta a fallas.

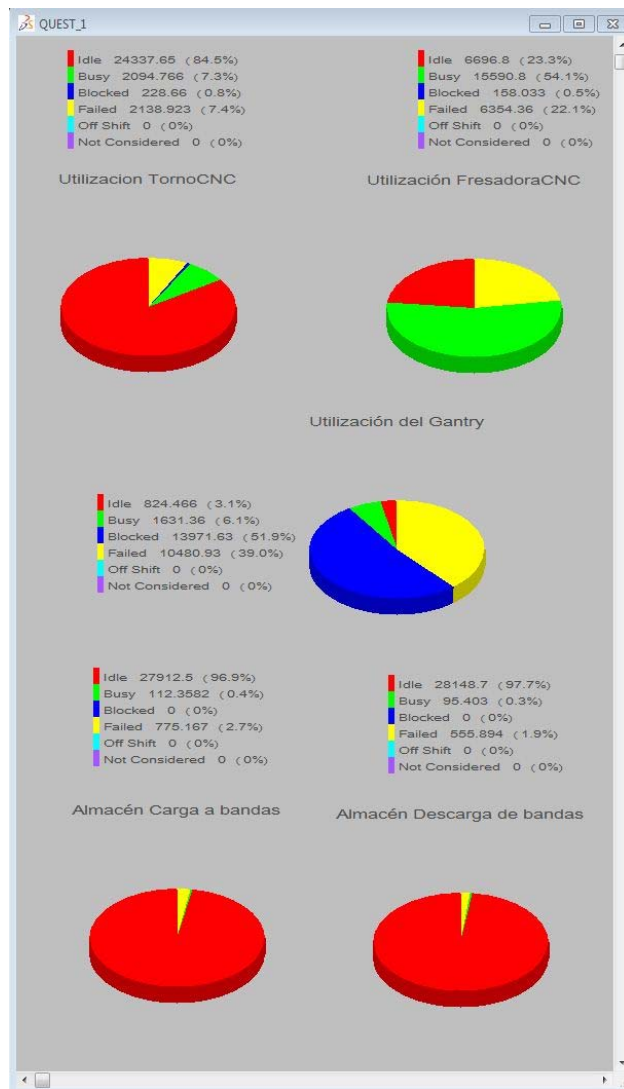


Figura 4.10. Porcentajes de utilización de los equipos en 8 horas de fabricación con fallas programadas por distribuciones de probabilidad.



Figura 4.10. Resumen de datos al final de la corrida y el estado final en la fresadora CNC en el modelo con fallas probabilísticas.

En la disminución del tiempo de ocupación de las máquinas será necesario crear los procedimientos de cambio y la estandarización de métodos y tiempos que ayuden a disminuir el tiempo dedicado a la reparación y ajuste del sistema. Aplicar técnicas de cambios rápidos de herramientas (SMED) y la precalibración de las herramientas antes del cambio así como el diseño de nuevos sistemas de sujeción podrá disminuir los efectos de las fallas programadas en la producción al finalizar las 8 horas preestablecidas.

4.4. Modelo propuesto B. Fallas por eventos programadas

En éste modelo se representan las fallas de forma determinísticas o por eventos ya que después de presentarse cierto número de veces y condiciones que se registran de forma acumulativa entonces se presentan la falla programada y en consecuencia las operaciones de mantenimiento o ajuste de dispositivos.

La ejecución de las fallas en periodos predeterminados de tiempo resulta de la estrecha relación entre las piezas y las operaciones de fabricación pertenecientes a una familia de partes. Además, las operaciones de transporte y sujeción también obedecen a las geometrías de las piezas pertenecientes a familias de partes lo que reduce el tiempo de mantenimiento y ajuste debido a la similitud de características que se deben verificar durante la falla programada del equipo. A continuación se presenta en modelo PN para la ejecución de fallas programadas por eventos en el FMS de UPAEP.

4.4.1. Representación del Modelo

La figura 4.11 se muestra la PN con programación de fallas por eventos donde para el caso de la fresadora CNC el place P39 cuenta el número piezas que entran a la máquina y que después de cierto número de veces que se haya fabricado la pieza se interrumpe la operación para dar paso a las actividades de mantenimiento y ajuste de la máquina. En éste modelo los acumuladores por estación controlar el comportamiento de fallas del sistema, además, pueden acumular eventos de otras estaciones o dispositivos siempre y cuando exista la comunicación establecida entre ellas.

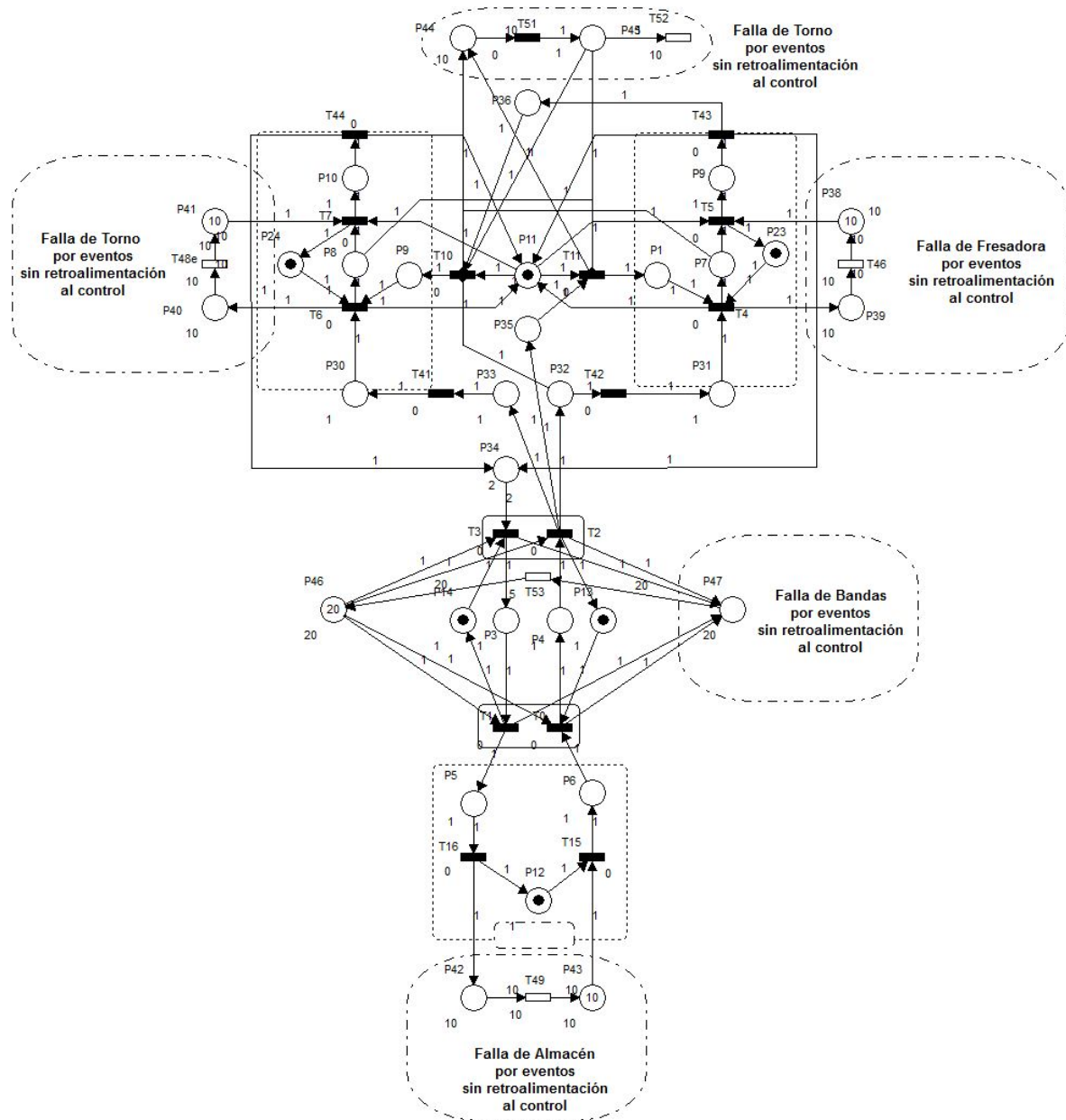


Figura 4.11. PN del FMS de UPAEP con modelado de fallas programadas según la secuencia o acumulación de eventos.

4.4.2. Obtención de resultados

En la figura 4.12 se observan los resultados de la simulación de 8 horas de operación del FMS de UPAEP indicando los porcentajes de utilización, falla y disponibilidad de los equipos. En el caso del la fresadora se obtiene un 67.8% de utilización ligeramente más bajo que el observado en los resultados del modelo sin programación de fallas de la figura 4.7. Existe un 2.2% de tiempo destinado a las fallas programadas y lo mismo se refleja en las demás estaciones.

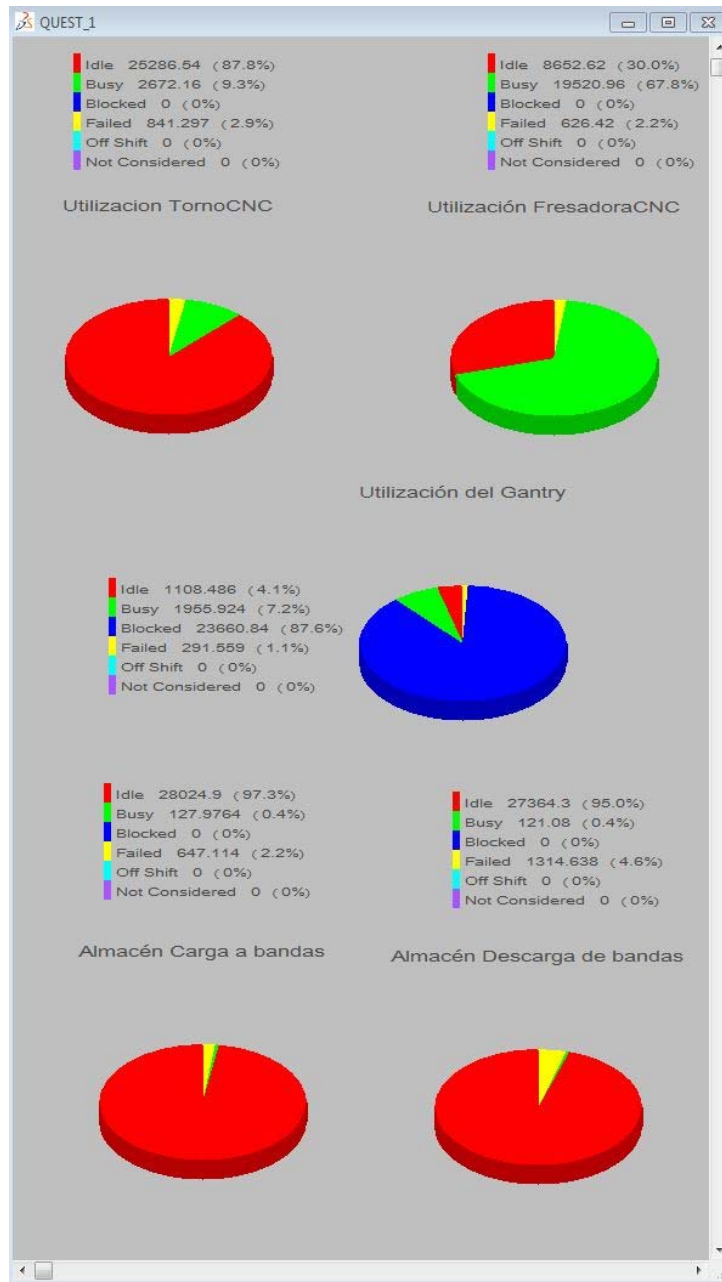


Figura 4.12. Porcentajes de utilización de los equipos en 8 horas de fabricación con fallas programadas por eventos.

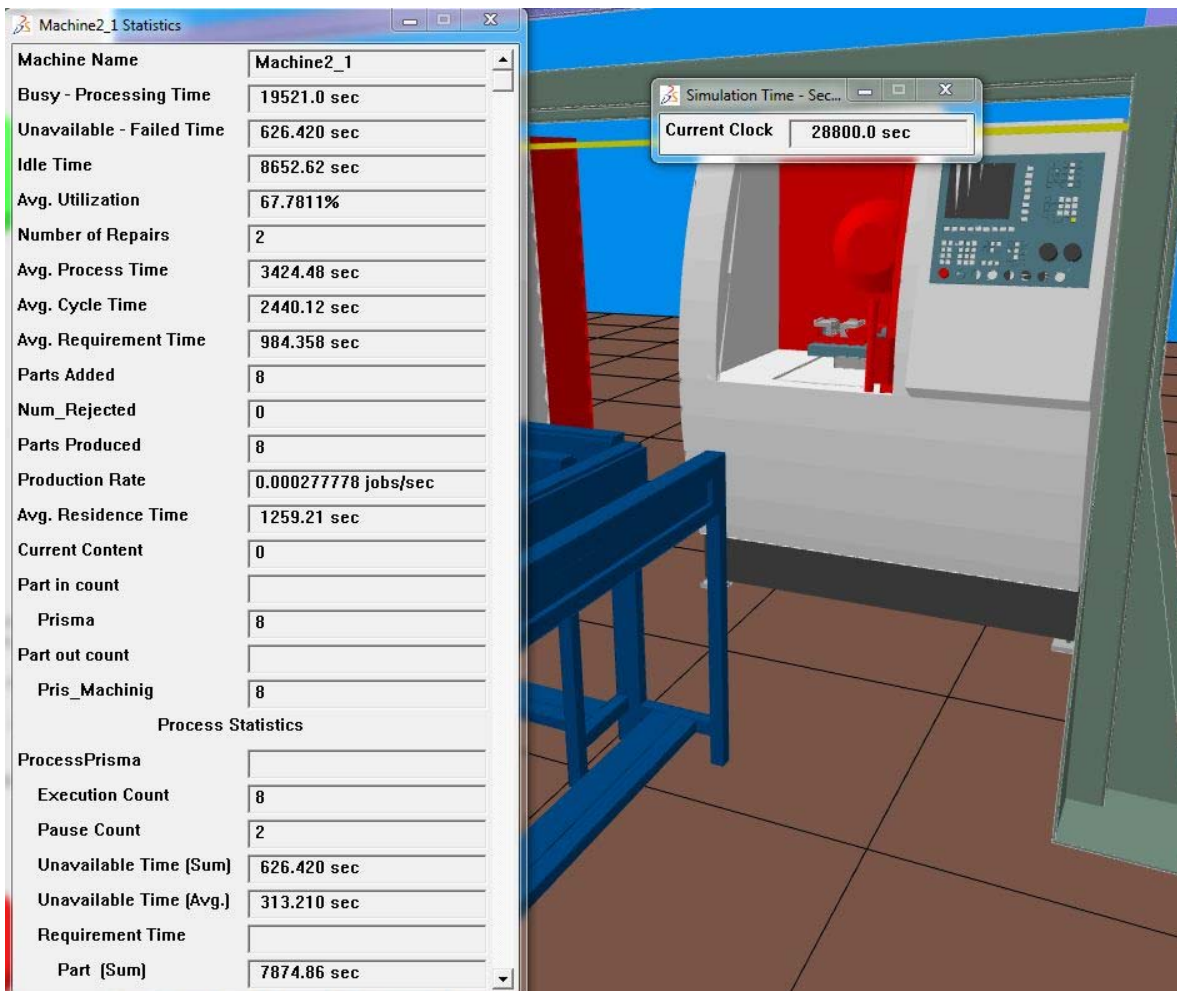


Figura 4.12. Resumen de datos al final de la corrida con fallas programadas por eventos y el estado obtenido para la fresadora CNC.

En la figura 4.12. se observa que el número de piezas fabricadas por la Fresadora CNC es de 8 que es un resultado similar al obtenido sin programar fallas en el sistema. En el anexo 9 se muestran los resultados de la corrida durante 8 horas. Éstos resultados revelan que la prevención de fallas mediante la programación de mantenimientos y recalibraciones de forma probabilística o por eventos asegura el funcionamiento del sistema tal como si nunca estuviera sujeto a desgaste.

Sin embargo, para lograr un nivel de control similar al planteado en estos modelos se requieren de dispositivos automatizados de control que de forma centralizada pueda tomar control de las operaciones pausando las actividades mientras se llevan a cabo el mantenimiento y ajuste de equipos.

A continuación se presenta la propuesta de control de fallas programadas para las estaciones del FMS de UPAEP.

4.5. Propuesta de Control.

La propuesta de control incluye dispositivos de monitoreo y control inteligente, reconfigurable y holónico en una mezcla de conceptos que pueden ser definidos mediante la PN identificando las entidades, los dispositivos y el comportamiento del sistema que necesitan ser controlados o supervisados para tomar acciones previas a las fallas probabilísticas o determinísticas.

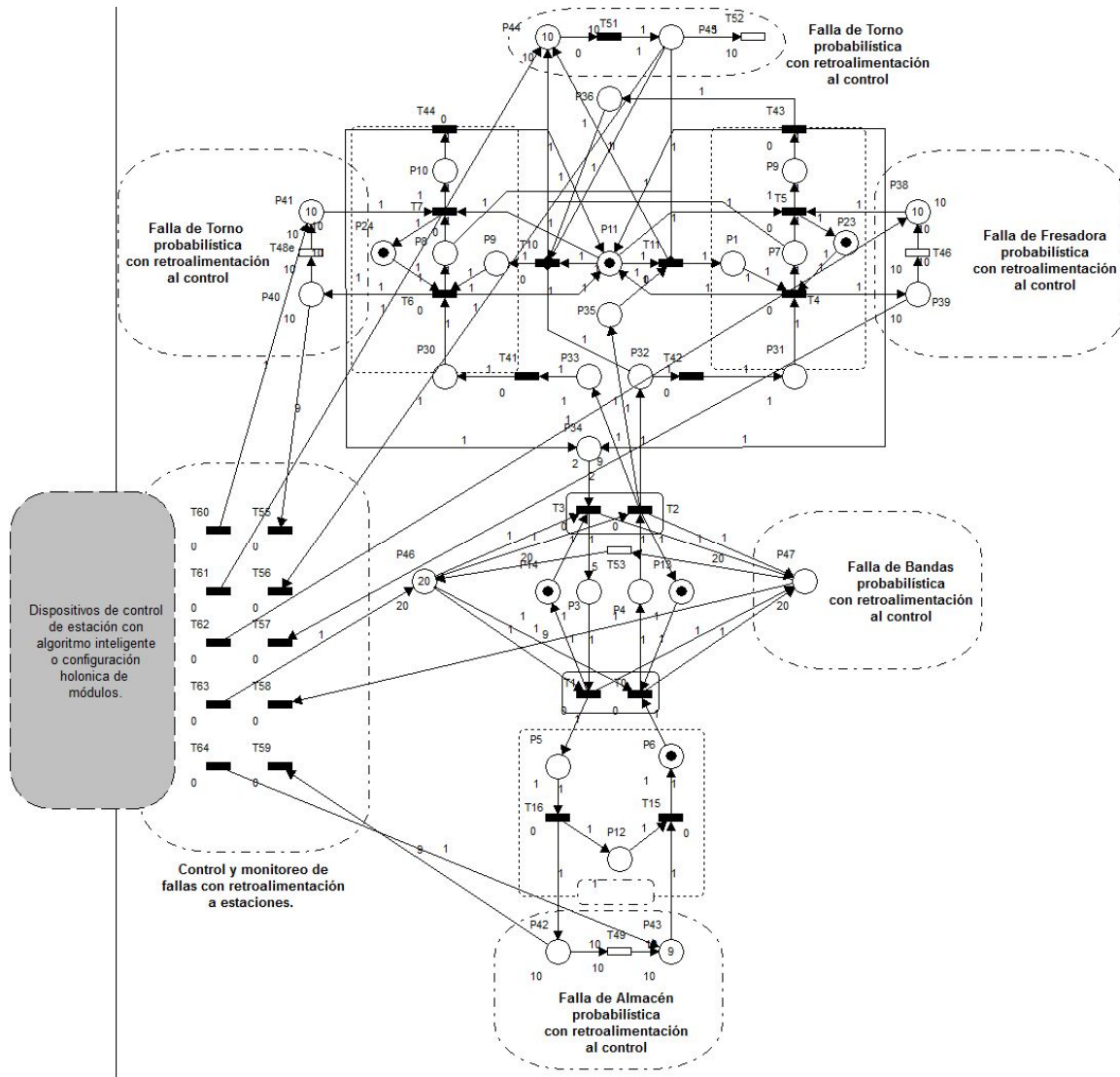


Figura 4.13. Propuesta de control centralizado y supervisorio para el control de fallas probabilísticas o por eventos.

La arquitectura de control actual del sistema con señales de entrada y salida discretas disminuye la capacidad de reacción a las fallas de los componentes del FMS. En el modelo PN se han modelado las secuencias de control de fallas y en el modelo virtual se puede

programar la ejecución de fallas indicándonos el desempeño de cada equipo y como una falla puede afectar un FMS en su flexibilidad e integración.

Para el modelo anterior es necesaria la reestructuración de la arquitectura de control así como la lógica de programación de las estaciones de tal forma que permitan el intercambio de información a un único dispositivo de monitoreo como podría ser un Controlador Lógico Programable Master Class 1 de Siemens como se muestra en la figura 4.14. Éste dispositivo tiene acceso continuo a los dispositivos de control de estaciones permitiendo la continuidad o pausa de operaciones para las actividades de mantenimiento o monitoreo en sitio.

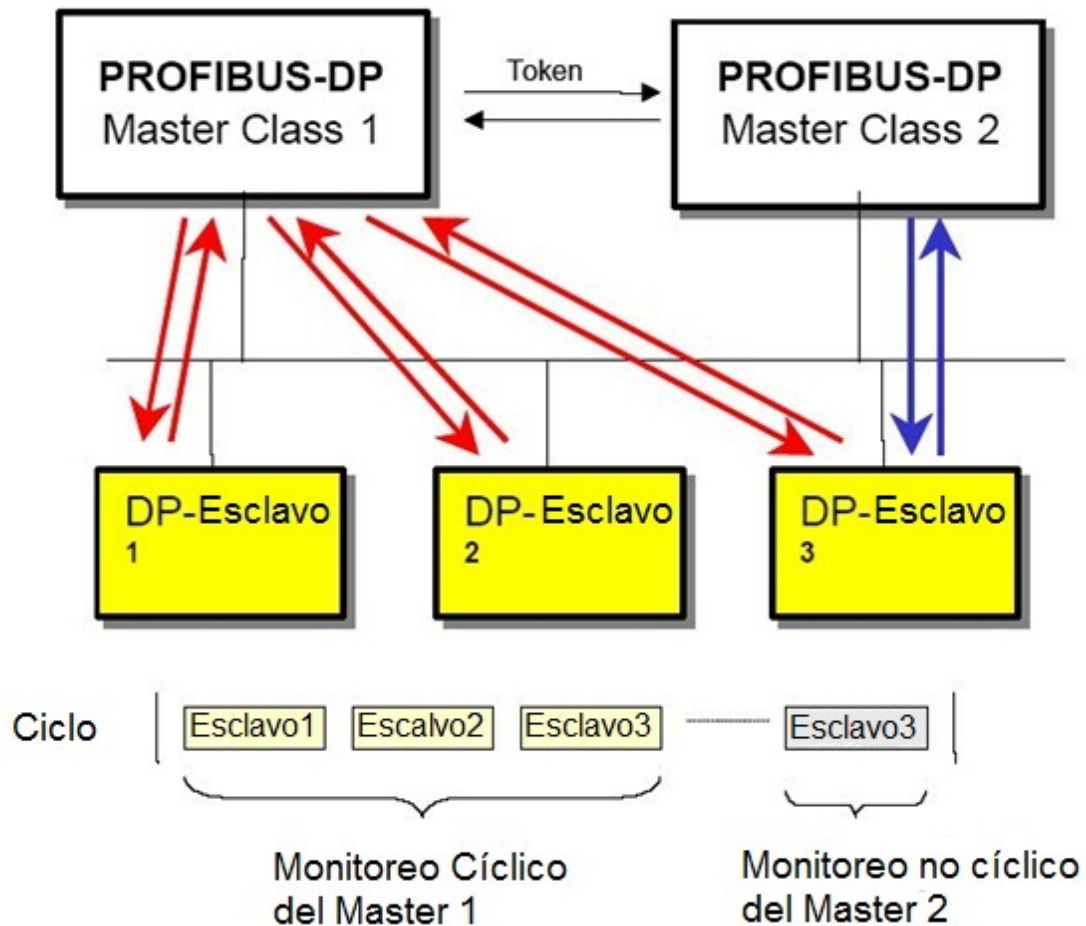


Figura 4.14. Esquema de control y monitoreo de estaciones con protocolo de comunicación PROFIBUS y PLCs Master Class 1 de Siemens®.

De igual forma se requiere un protocolo unificador que transmita datos en tiempo real para lograr las operaciones de diferentes familias de partes. Dicho protocolo puede ser PROFINET el cual permite la transferencia de datos entre estaciones y a través de internet facilitando el monitoreo remoto de estaciones. La configuración de las estaciones permitirán el envío de programas y recepción de reportes de fabricación que podrán ser base para la creación y alimentación de un sistema experto que ajuste los valores de ejecución de fallas según la familia de partes seleccionada para la fabricación.

Conclusiones

Por las características del equipo y además por su condición didáctica es muy probable que la frecuencia de fallas sea alta y que existan eventos que las originen con más facilidad que otros por lo que en para prevenir que ocurra la falla de manera aleatoria ésta deberá ser programada, o mejor dicho, la supervisión y mantenimiento del equipo y secuencias deberán realizarse para cada equipo según un tiempo de operación.

Dependiendo la clasificación y codificación de la pieza (o la familia a la que pertenezca) se programa la falla por eventos o por distribución de probabilidad permitiendo al sistema de control reaccionar con los mantenimientos y cambios de herramienta así como con la supervisión de las condiciones de los dispositivos de sujeción.

El bajo nivel de flexibilidad en las bandas transportadoras y en los sistemas de sujeción de las piezas limita el desarrollo de secuencias de fabricación que aunque restringe el tipo y características de las fallas posibles, la reacción a la falla no puede ser llevada a cabo de manera desasistida y retroalimentada dejando como alternativa la prevención mediante la pausa de actividades previas a la falla según eventos o a distribuciones de probabilidad.

De la misma forma el bajo nivel de integración debido a la incompatibilidad o nivel de control básico entre estaciones limita el número de secuencias de fabricación y los cambios de producción por familia de partes ya que el principal lazo no establecido con el control del sistema es la comunicación de datos entre el robot y las máquinas CNC que permita el envío de los programas de fabricación según la pieza y familia para asignación de los sistemas de sujeción. Sin embargo, mediante la utilización del modelo virtual aquí propuesto es posible visualizar los componentes e interacciones necesarias para llevar al FMS de UPAEP a niveles de flexibilidad e integración característicos de los FMS de la actualidad.

El control de estaciones según el modelo propuesto requerirá de un dispositivo supervisorio que asigne las acciones de mantenimiento y control de fallas mediante eventos o distribuciones de probabilidad resultado de monitoreo y análisis continuo de las estaciones. Dicho dispositivo deberá tomar control por encima del nivel de fabricación permitiendo la ejecución de procesos que no intervienen en la aparición de una falla y pausando aquellos procesos que requieren de acciones preventivas y que además permita la reanudación de los procesos pausados. Lo anterior también requiere que los dispositivos actuales de control de estaciones permitan la transferencia de datos de programación y retroalimentación de resultados. En la actualidad el sistema solo tiene soporte de secuenciación de tareas de manera individual ya que a pesar de tener una red PROFIBUS los dispositivos no soportan el monitoreo cíclico y transferencia de datos.

La preparación del sistema para la ejecución continua durante 8 horas requiere de ajustes de los sistemas de sujeción y para el traslado de piezas, adquisición y preparación de herramientas, así como de la reprogramación de secuencias y velocidades de operación. Adicionalmente como ya se mencionó no existe el nivel de integración suficiente para hacer cambios de fabricación para diferentes familias de partes debido a la falta de comunicación entre estaciones.

El estudio también permite tener un diagnóstico del estado actual de flexibilidad e integración del FMS de UPAEP para explorar las futuras adquisiciones y reconfiguraciones que lleven al sistema a un nivel de ejecución continuo así como una operación paralela a su modelo virtual que propicie un método futuro para evitar secuencias con tendencia a falla en la introducción de una nueva familia de partes o en una operación a distancia.

El modelo virtual y sus modelo en PN revelan el camino de mejoras que debe recorrerse para llevar al FMS de UPAEP a un estado de flexibilidad e integración necesarios para lograr la transformación y acciones que podrían ubicarlo en la carrera del diseño de un sistema holónico-reconfigurable e inteligente.

A pesar de los sistemas que se integren al sistema y de la reconfiguración de estaciones es necesario trabajar en los procedimientos de mantenimiento y ajuste realizado por personas para disminuir el tiempo ocupado para dichas actividades.

La versión completa de QUEST® permite la colaboración en línea de diferentes protagonistas en la simulación que puede ser el primer paso para lograr la ejecución virtual y a distancia. Lo anterior permite que previo a la operación del FMS de UPAEP sea posible crear la secuencia de actividades y establecer las probabilidades de falla para que una vez creados los programas de secuenciación de las estaciones usando PN y las operaciones de fabricación sea posible visualizar su comportamiento.

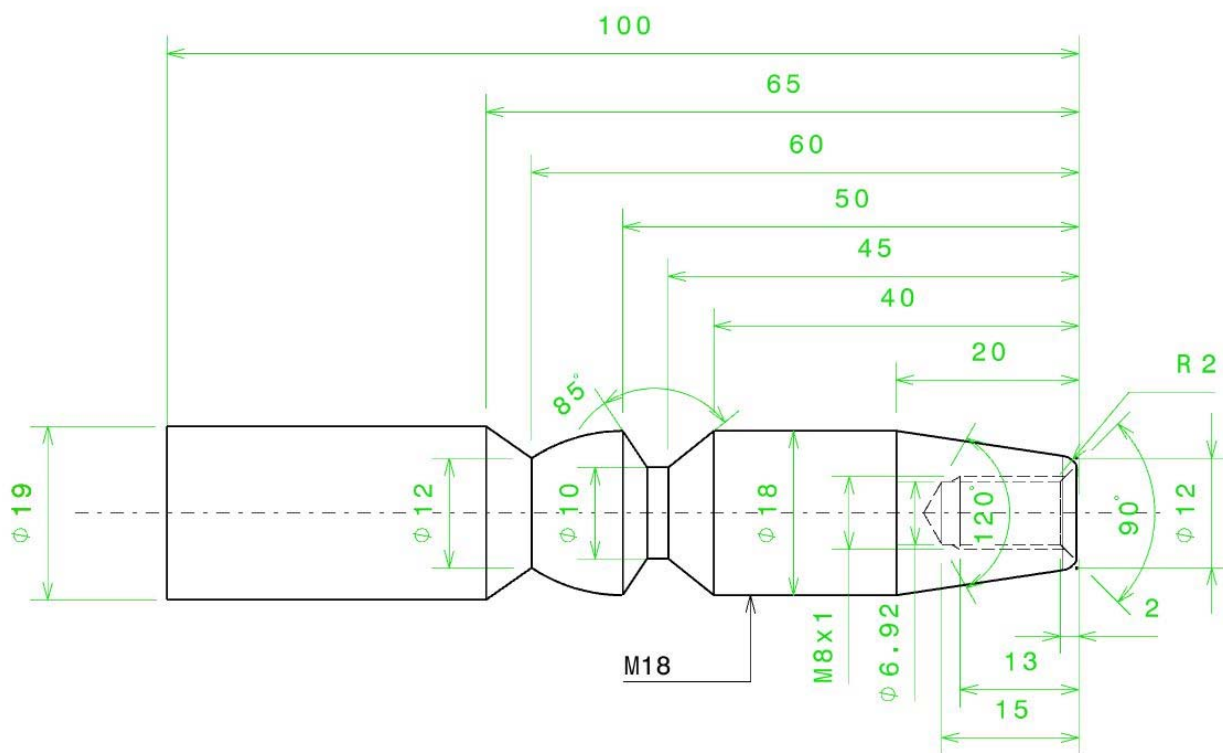
Los sistemas de sujeción y transporte de materiales ya sea como materia prima o como producto terminado además de ser detonadores de fallas requieren de tiempo para su mantenimiento y ajuste o incluso sustitución. Es por ello que para el FMS de UPAEP se deben diseñar dispositivos de sujeción y traslado de materiales que se adapten a las geometrías que van desde materia prima hasta las geometrías de las familias de partes. Estos dispositivos deben dotar al equipo con la Percepción Sensorial de los sistemas Holónicos, Reconfigurables e inteligentes del futuro que le permitan reconocer su entorno como cambios de geometría, ubicación, dirección, etc. El desarrollo de estos sistemas de sujeción y traslado debe proyectar u aumentar la flexibilidad del sistema adaptándolo de manera ágil a traslado de materiales entre estaciones.

Utilizar herramientas de simulación en 3D permite al usuario identificar de forma ágil el comportamiento del sistema y las operaciones de transporte y fabricación ya que de manera visual se identifican las interrupciones y el destino de las piezas durante y al finalizar la corrida de la simulación. La versatilidad de QUEST® permitió en éste estudio modelar el FMS de UPAEP con un nivel de detalle elevado que podrá aplicarse en investigaciones futuras para desarrollar la operación a distancia facilitando la reprogramación y ejecución de secuencias de diferentes usuarios.

Eduardo Lebano Pérez

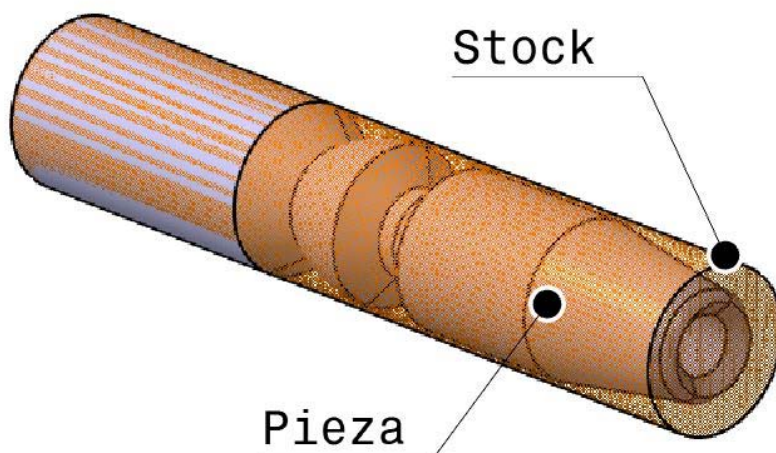
Anexos

ANEXO 1
Planes de manufactura **Familia 1**
T1_Fam1



Pieza T1_Fam1

Material: Cilindro de Aluminio 6061 de $\phi 19\text{mm}$ x 100mm



ANEXO 1

Planes de manufactura **Familia 1**

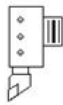
T1_Fam1

SHOP FLOOR DOCUMENTATION T1_Fam1.CATProcess

Part operation : [Part Operation.1](#)

Manufacturing Program.1

[Turning Tool Change.1](#)
Type : ToolChangeLathe



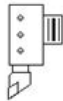
Assembly : [Turning Tool Assembly.1](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T1 External Insert-Holder](#) (External Insert-Holder)

[Rough Turning.1](#)
Type : Rough Turning



Assembly : [Turning Tool Assembly.1](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T1 External Insert-Holder](#) (External Insert-Holder)
Insert : [CNMA120408](#) (Diamond Insert)

[Turning Tool Change.2](#)
Type : ToolChangeLathe



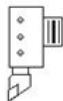
Assembly : [Turning Tool Assembly.3](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T2 External Insert-Holder](#) (External Insert-Holder)

[Profile Finish Turning.2](#)
Type : Profile Finish Turning



Assembly : [Turning Tool Assembly.3](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T2 External Insert-Holder](#) (External Insert-Holder)
Insert : [DNMG110404](#) (Diamond Insert)

[Turning Tool Change.3](#)
Type : ToolChangeLathe



Assembly : [Turning Tool Assembly.3_1](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T3 External Groove Insert-Holder](#) (External Groove Insert-Holder)

[Recess Turning.1](#)
Type : Recess Turning



Assembly : [Turning Tool Assembly.3_1](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T3 External Groove Insert-Holder](#) (External Groove Insert-Holder)
Insert : [Groove Insert.5](#) (Groove Insert)

[Groove Finish Turning.1](#)
Type : Groove Finish Turning



Assembly : [Turning Tool Assembly.3_1](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T3 External Groove Insert-Holder](#) (External Groove Insert-Holder)
Insert : [Groove Insert.5](#) (Groove Insert)

ANEXO 1

Planes de manufactura **Familia 1**

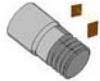
T1_Fam1

Turning Tool Change.4
Type : ToolChangeLathe



Assembly : [Turning Tool Assembly.5](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T4 External Thread Insert-Holder](#) (External Thread Insert-Holder)

Thread Turning.1
Type : Thread Turning



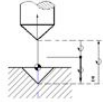
Assembly : [Turning Tool Assembly.5](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T4 External Thread Insert-Holder](#) (External Thread Insert-Holder)
Insert : [R166.0L-16MM01-150](#) (Thread Insert)

Tool Change.5
Type : Tool Change



Tool : [T5 Spot Drill D 15](#)
type : Spot Drill

Spot Drilling.1
Type : Spot Drilling



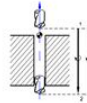
Tool : [T5 Spot Drill D 15](#)
type : Spot Drill

Tool Change.6
Type : Tool Change



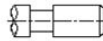
Tool : [T6 Drill D 10](#)
type : Drill

Drilling.1
Type : Drilling



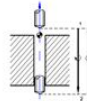
Tool : [T6 Drill D 10](#)
type : Drill

Tool Change.7
Type : Tool Change



Tool : [T7 Tap D 10](#)
type : Tap

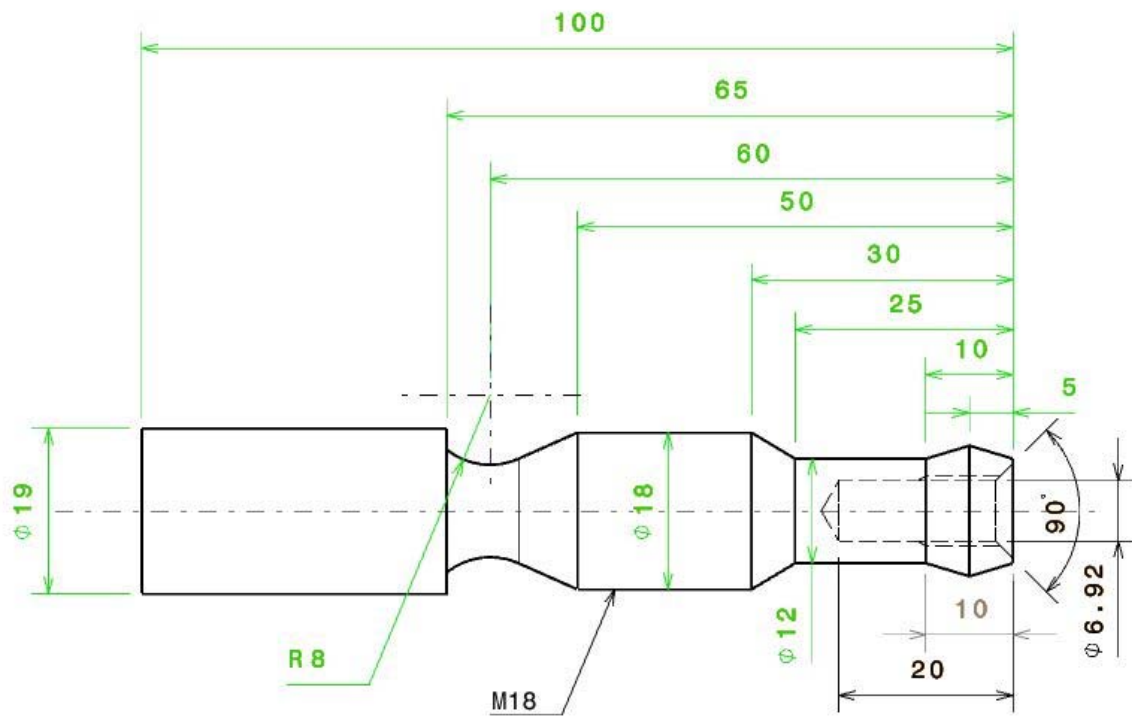
Tapping.1
Type : Tapping



Tool : [T7 Tap D 10](#)
type : Tap

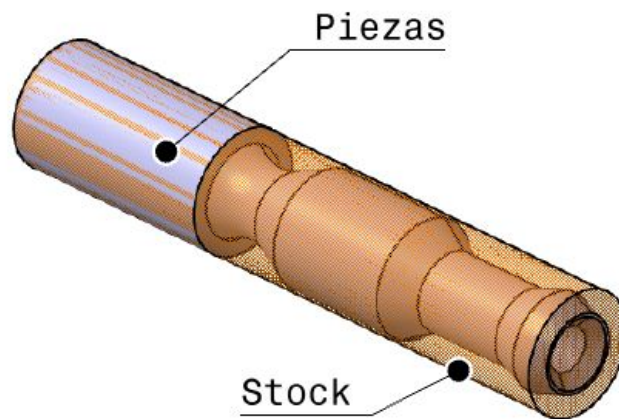
Program cutting time : 2' 29"
Program total time : 4' 30"

ANEXO 1
Planes de manufactura **Familia 1**
T2_Fam1



Pieza T2_Fam1

Material: Cilindro de Aluminio 6061 de $\phi 19\text{mm}$ x 100mm



ANEXO 1

Planes de manufactura **Familia 1**

T2_Fam1

SHOP FLOOR DOCUMENTATION

T2_Fam1.CATProcess

Part operation : [Part Operation.1](#)

Manufacturing Program.1

[Turning Tool Change.1](#)
Type : ToolChangeLathe



Assembly : [Turning Tool Assembly.1](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T1 External Insert-Holder](#) (External Insert-Holder)

[Rough Turning.1](#)
Type : Rough Turning



Assembly : [Turning Tool Assembly.1](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T1 External Insert-Holder](#) (External Insert-Holder)
Insert : [Diamond Insert r 0.5](#) (Diamond Insert)

[Turning Tool Change.2](#)
Type : ToolChangeLathe



Assembly : [Turning Tool Assembly.2](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T2 External Insert-Holder 1](#) (External Insert-Holder)

[Profile Finish Turning.1](#)
Type : Profile Finish Turning



Assembly : [Turning Tool Assembly.2](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T2 External Insert-Holder 1](#) (External Insert-Holder)
Insert : [Diamond Insert r 0.5](#) (Diamond Insert)

[Turning Tool Change.3](#)
Type : ToolChangeLathe



Assembly : [Turning Tool Assembly.3](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T3 External Groove Insert-Holder](#) (External Groove Insert-Holder)

[Groove Turning.1](#)
Type : Groove Turning



Assembly : [Turning Tool Assembly.3](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T3 External Groove Insert-Holder](#) (External Groove Insert-Holder)
Insert : [Groove Insert.3](#) (Groove Insert)

[Groove Finish Turning.1](#)
Type : Groove Finish Turning



Assembly : [Turning Tool Assembly.3](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T3 External Groove Insert-Holder](#) (External Groove Insert-Holder)
Insert : [Groove Insert.3](#) (Groove Insert)

[Turning Tool Change.4](#)
Type : ToolChangeLathe



Assembly : [Turning Tool Assembly.4](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T4 External Thread Insert-Holder](#) (External Thread Insert-Holder)

ANEXO 1

Planes de manufactura **Familia 1**

T2_Fam1

[Thread Turning.1](#)
Type : Thread Turning



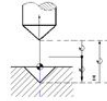
Assembly : [Turning Tool Assembly.4](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T4 External Thread Insert-Holder](#) (External Thread Insert-Holder)
Insert : [Thread Insert r 0.001](#) (Thread Insert)

[Tool Change.2](#)
Type : Tool Change



Tool : [T5 Spot Drill D 5](#)
type : Spot Drill

[Spot Drilling.2](#)
Type : Spot Drilling



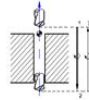
Tool : [T5 Spot Drill D 5](#)
type : Spot Drill

[Tool Change.3](#)
Type : Tool Change



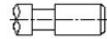
Tool : [T6 Drill D 6.917](#)
type : Drill

[Drilling.1](#)
Type : Drilling



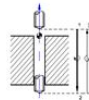
Tool : [T6 Drill D 6.917](#)
type : Drill

[Tool Change.4](#)
Type : Tool Change



Tool : [T7 Tap D 8](#)
type : Tap

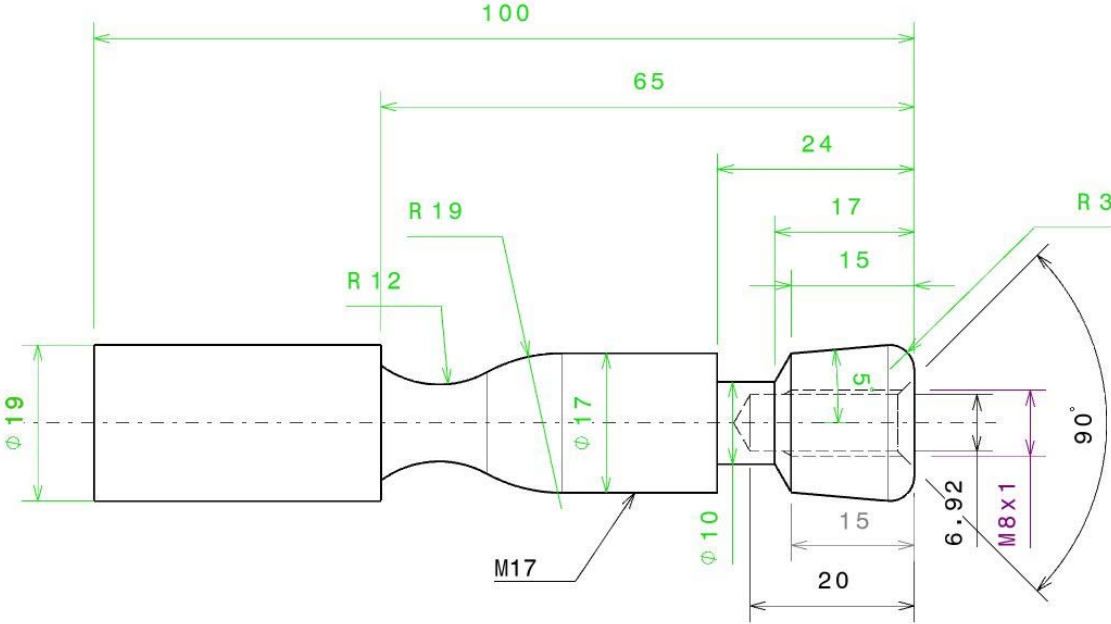
[Tapping.1](#)
Type : Tapping



Tool : [T7 Tap D 8](#)
type : Tap

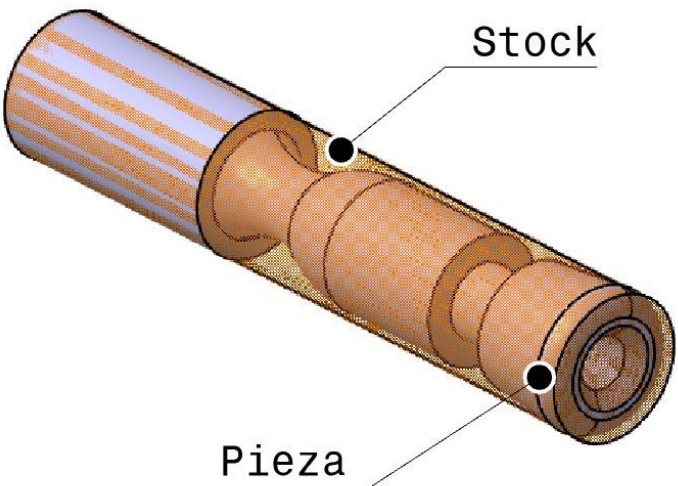
Program cutting time : 4' 5"
Program total time : 6' 2"

ANEXO 1
Planes de manufactura **Familia 1**
T3_Fam1



Pieza T3_Fam1

Material: Cilindro de Aluminio 6061 de $\phi 19$ mm x 100mm



ANEXO 1

Planes de manufactura **Familia 1**

T3_Fam1

SHOP FLOOR DOCUMENTATION

T3_Fam1.CATProcess

Part operation : [Part Operation.1](#)

Manufacturing Program.1

[Turning Tool Change.1](#)
Type : ToolChangeLathe



Assembly : [Turning Tool Assembly.1](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T1 External Insert-Holder](#) (External Insert-Holder)

[Rough Turning.1](#)
Type : Rough Turning



Assembly : [Turning Tool Assembly.1](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T1 External Insert-Holder](#) (External Insert-Holder)
Insert : [Diamond Insert r 0,5](#) (Diamond Insert)

[Turning Tool Change.2](#)
Type : ToolChangeLathe



Assembly : [Turning Tool Assembly.2](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T2 External Groove Insert-Holder](#) (External Groove Insert-Holder)

[Groove Turning.1](#)
Type : Groove Turning



Assembly : [Turning Tool Assembly.2](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T2 External Groove Insert-Holder](#) (External Groove Insert-Holder)
Insert : [Groove Insert.2](#) (Groove Insert)

[Groove Turning.2](#)
Type : Groove Turning



Assembly : [Turning Tool Assembly.2](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T2 External Groove Insert-Holder](#) (External Groove Insert-Holder)
Insert : [Groove Insert.2](#) (Groove Insert)

[Turning Tool Change.3](#)
Type : ToolChangeLathe



Assembly : [Turning Tool Assembly.2.1](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T4 External Insert-Holder](#) (External Insert-Holder)

[Profile Finish Turning.1](#)
Type : Profile Finish Turning



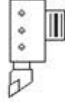
Assembly : [Turning Tool Assembly.2.1](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T4 External Insert-Holder](#) (External Insert-Holder)
Insert : [Diamond Insert r 0,5](#) (Diamond Insert)

ANEXO 1

Planes de manufactura **Familia 1**

T3_Fam1

Turning Tool Change.4
Type : ToolChangeLathe



Assembly : [Turning Tool Assembly.4](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T5 External Thread Insert-Holder](#) (External Thread Insert-Holder)

Thread Turning.1
Type : Thread Turning



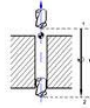
Assembly : [Turning Tool Assembly.4](#) (Turning Tool Assembly)
Tool : [T5 External Thread Insert-Holder](#) (External Thread Insert-Holder)
Insert : [Thread Insert r 0.001](#) (Thread Insert)

Tool Change.1
Type : Tool Change



Tool : [T5 Drill D 11](#)
type : Drill

Drilling.1
Type : Drilling



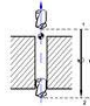
Tool : [T5 Drill D 11](#)
type : Drill

Tool Change.2
Type : Tool Change



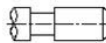
Tool : [T6 Drill D 6.917](#)
type : Drill

Drilling.2
Type : Drilling



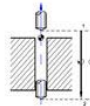
Tool : [T6 Drill D 6.917](#)
type : Drill

Tool Change.3
Type : Tool Change



Tool : [T7 Tap D 8](#)
type : Tap

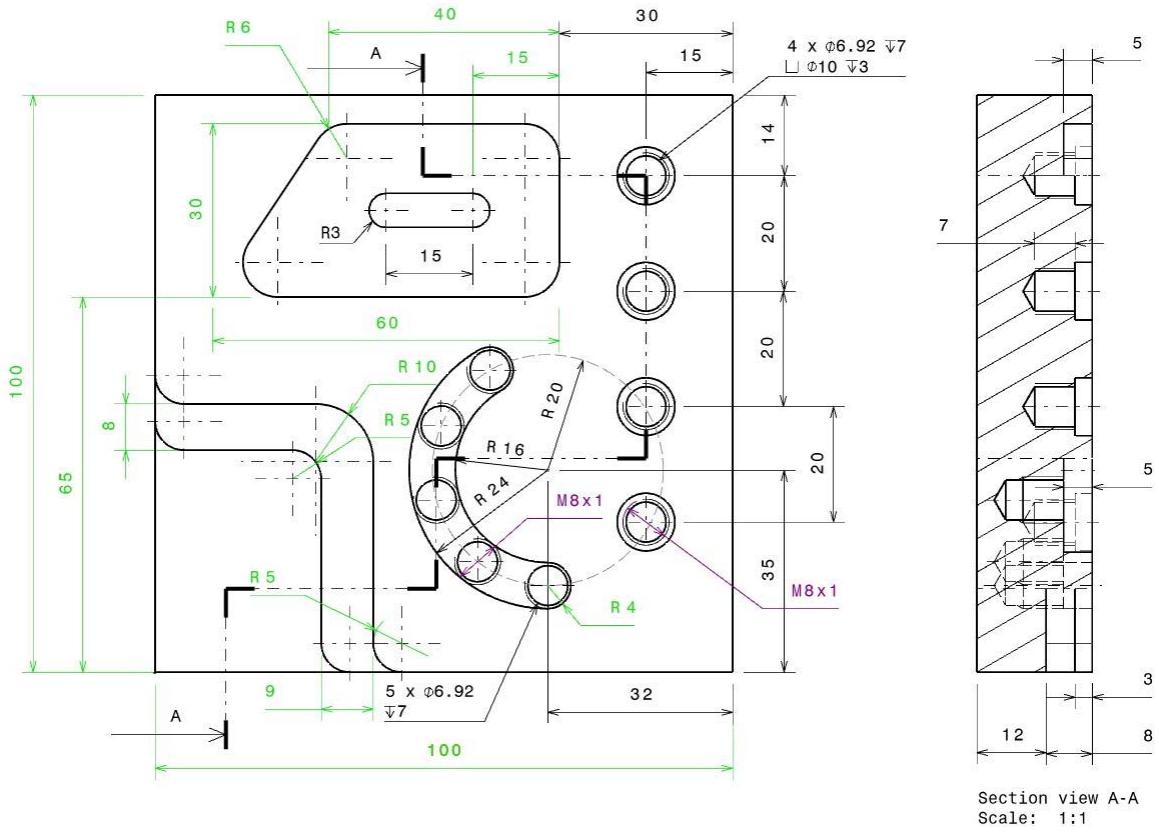
Tapping.1
Type : Tapping



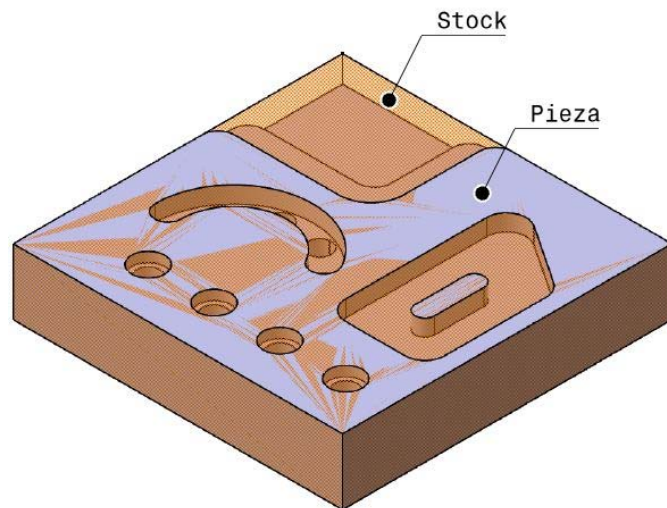
Tool : [T7 Tap D 8](#)
type : Tap

Program cutting time : 5' 32"
Program total time : 7' 53"

ANEXO 2
Planes de manufactura Familia 2
M1_Fam2



Pieza M1_Fam2
 Material: Prisma de Aluminio 6061 de 100m x 100mm x 20 mm



ANEXO 2

Planes de manufactura **Familia 2**

M1_Fam2

SHOP FLOOR DOCUMENTATION M1_Fam2.CATProcess

Part operation : [Part Operation.1](#)

Manufacturing Program.1

[Tool Change.1](#)
Type : Tool Change



Tool : [T1 Face Mill D 50](#)
type : Face Mill

[Facing.1](#)
Type : Facing



Tool : [T1 Face Mill D 50](#)
type : Face Mill

[Tool Change.2](#)
Type : Tool Change



Tool : [T2 End Mill D 12](#)
type : End Mill

[Pocketing.1](#)
Type : Pocketing



Tool : [T2 End Mill D 12](#)
type : End Mill

[Tool Change.3](#)
Type : Tool Change



Tool : [T3 End Mill D 10](#)
type : End Mill

[Pocketing.3](#)
Type : Pocketing



Tool : [T3 End Mill D 10](#)
type : End Mill

[Tool Change.4](#)
Type : Tool Change



Tool : [T4 End Mill D 20](#)
type : End Mill

ANEXO 2

Planes de manufactura **Familia 2**

M1_Fam2

[Profile Contouring.1](#)
Type : Profile Contouring



Tool : [T4 End Mill D 20](#)
type : End Mill

[Tool Change.5](#)
Type : Tool Change



Tool : [T5 End Mill D 8](#)
type : End Mill

[Curve Following.3](#)
Type : Curve Following

Tool : [T5 End Mill D 8](#)
type : End Mill

[Tool Change.6](#)
Type : Tool Change



Tool : [T6 End Mill D 6](#)
type : End Mill

[Pocketing.5](#)
Type : Pocketing



Tool : [T6 End Mill D 6](#)
type : End Mill

[Pocketing.6](#)
Type : Pocketing



Tool : [T6 End Mill D 6](#)
type : End Mill

[Pocketing.7](#)
Type : Pocketing



Tool : [T6 End Mill D 6](#)
type : End Mill

[Pocketing.8](#)
Type : Pocketing



Tool : [T6 End Mill D 6](#)
type : End Mill

[Tool Change.7](#)
Type : Tool Change



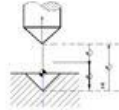
Tool : [T7 Spot Drill D 5](#)
type : Spot Drill

ANEXO 2

Planes de manufactura **Familia 2**

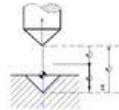
M1_Fam2

Spot Drilling.1
Type : Spot Drilling



Tool : **T7 Spot Drill D 5**
type : Spot Drill

Spot Drilling.6
Type : Spot Drilling



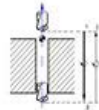
Tool : **T7 Spot Drill D 5**
type : Spot Drill

Tool Change.8
Type : Tool Change



Tool : **T8 Drill D 6.9**
type : Drill

Drilling.1
Type : Drilling



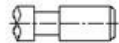
Tool : **T8 Drill D 6.9**
type : Drill

Drilling.2
Type : Drilling



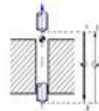
Tool : **T8 Drill D 6.9**
type : Drill

Tool Change.9
Type : Tool Change



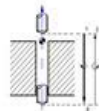
Tool : **T9 Tap D 8**
type : Tap

Tapping.1
Type : Tapping



Tool : **T9 Tap D 8**
type : Tap

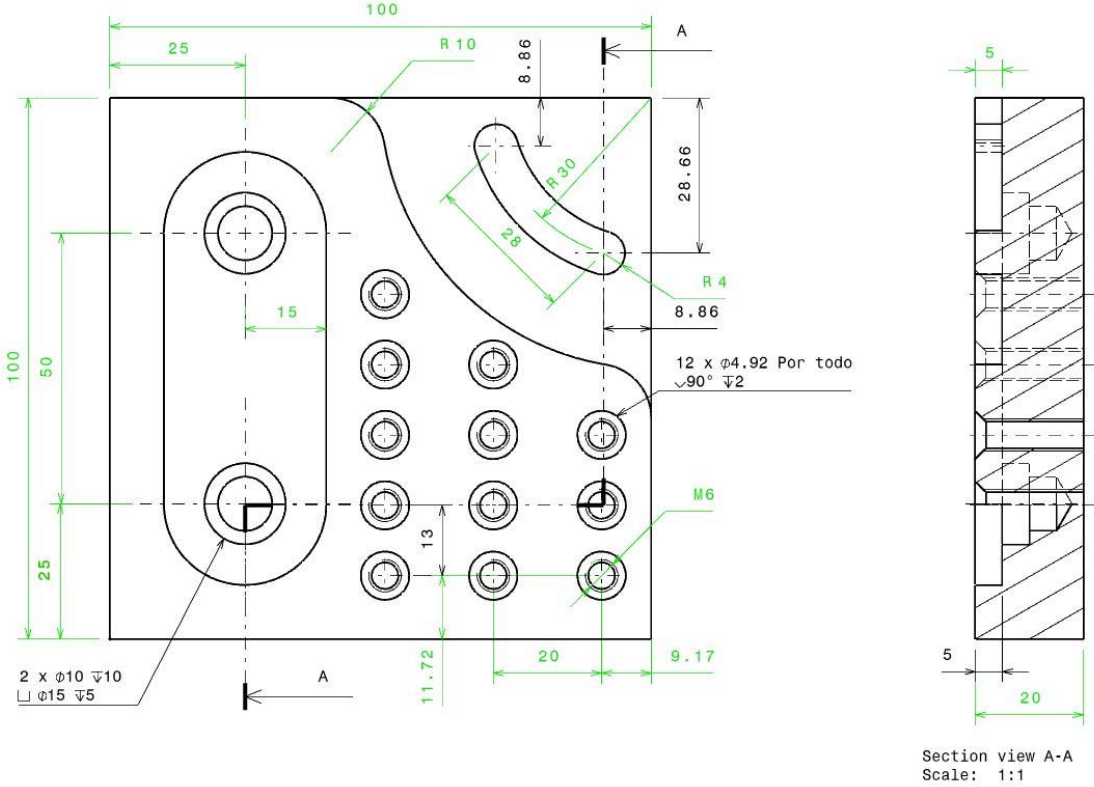
Tapping.2
Type : Tapping



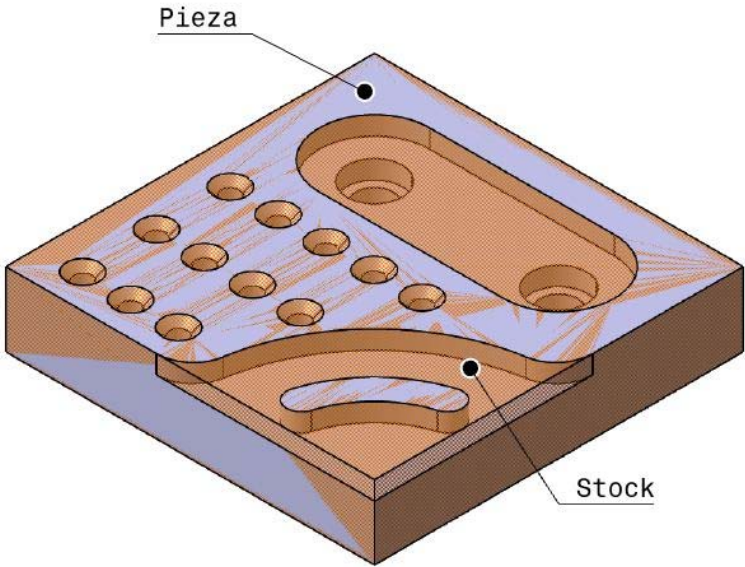
Tool : **T9 Tap D 8**
type : Tap

Program cutting time : 23' 38"
Program total time : 25' 40"

ANEXO 2
Planes de manufactura Familia 2
M2_Fam2



Pieza M2_Fam2
Material: Prisma de Aluminio 6061 de 100m x 100mm x 20 mm



ANEXO 2

Planes de manufactura **Familia 2**

M2_Fam2

SHOP FLOOR DOCUMENTATION
M2_Fam2.CATProcess

Part operation : Part Operation.1

Manufacturing Program.1

Tool Change.1
Type : Tool Change



Tool : T1 Face Mill D 20
type : Face Mill

Facing.1
Type : Facing



Tool : T1 Face Mill D 20
type : Face Mill

Tool Change.2
Type : Tool Change



Tool : T2 End Mill D 12
type : End Mill

Pocketing.1
Type : Pocketing



Tool : T2 End Mill D 12
type : End Mill

Tool Change.3
Type : Tool Change



Tool : T3 End Mill D 8
type : End Mill

Pocketing.2
Type : Pocketing



Tool : T3 End Mill D 8
type : End Mill

Tool Change.4
Type : Tool Change



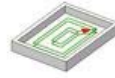
Tool : T4 End Mill D 6
type : End Mill

ANEXO 2

Planes de manufactura **Familia 2**

M2_Fam2

Pocketing.3
Type : Pocketing



Tool : [T4 End Mill D 6](#)
type : End Mill

Pocketing.4
Type : Pocketing



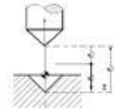
Tool : [T4 End Mill D 6](#)
type : End Mill

Tool Change.5
Type : Tool Change



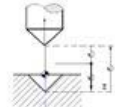
Tool : [T5 Spot Drill D 5](#)
type : Spot Drill

Spot Drilling.1
Type : Spot Drilling



Tool : [T5 Spot Drill D 5](#)
type : Spot Drill

Spot Drilling.2
Type : Spot Drilling



Tool : [T5 Spot Drill D 5](#)
type : Spot Drill

Tool Change.6
Type : Tool Change



Tool : [T6 Drill D 4.9](#)
type : Drill

Drilling.1
Type : Drilling



Tool : [T6 Drill D 4.9](#)
type : Drill

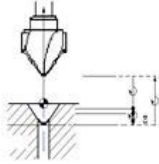
Tool Change.7
Type : Tool Change



Tool : [T7 Countersink D 18.828](#)
type : Countersink

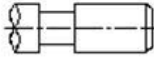
ANEXO 2
Planes de manufactura Familia 2
M2_Fam2

Counter Sinking.1
Type : Counter Sinking



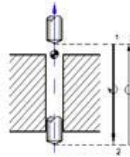
Tool : T7 Countersink D 18.828
type : Countersink

Tool Change.8
Type : Tool Change



Tool : T8 Tap D 5
type : Tap

Tapping.1
Type : Tapping



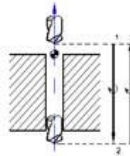
Tool : T8 Tap D 5
type : Tap

Tool Change.9
Type : Tool Change



Tool : T9 Drill D 10
type : Drill

Drilling.3
Type : Drilling



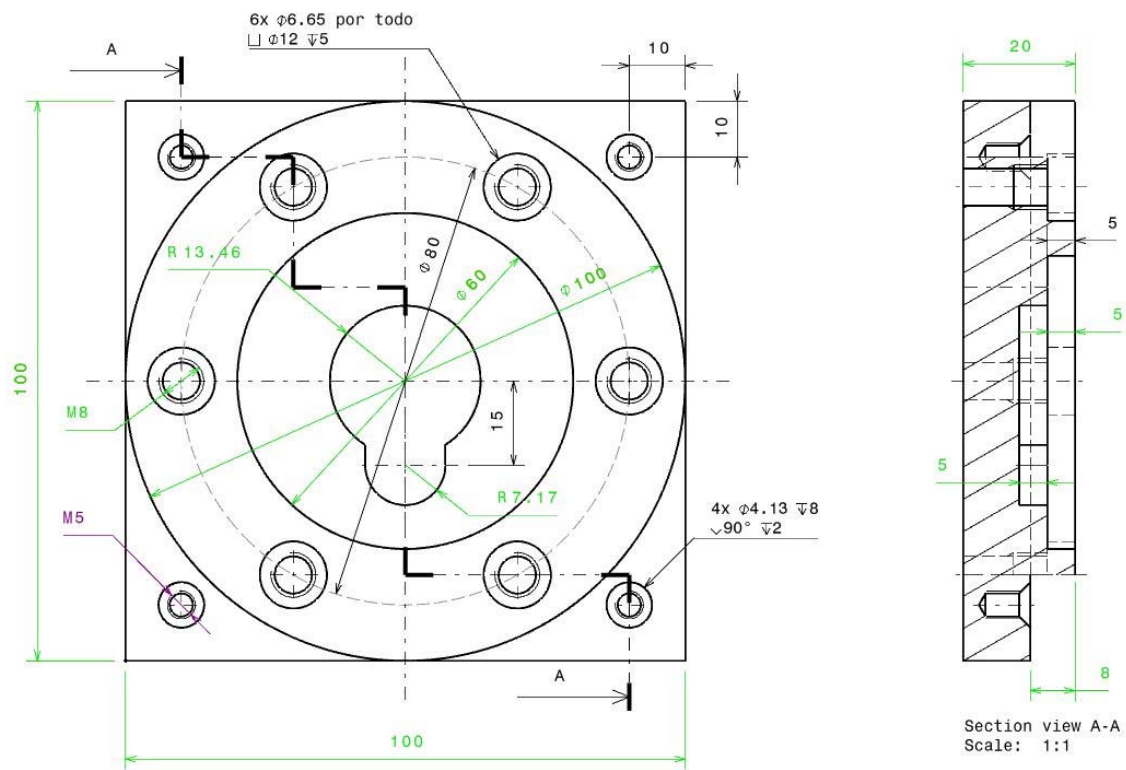
Tool : T9 Drill D 10
type : Drill

Program cutting time : 35' 46"
Program total time : 37' 32"

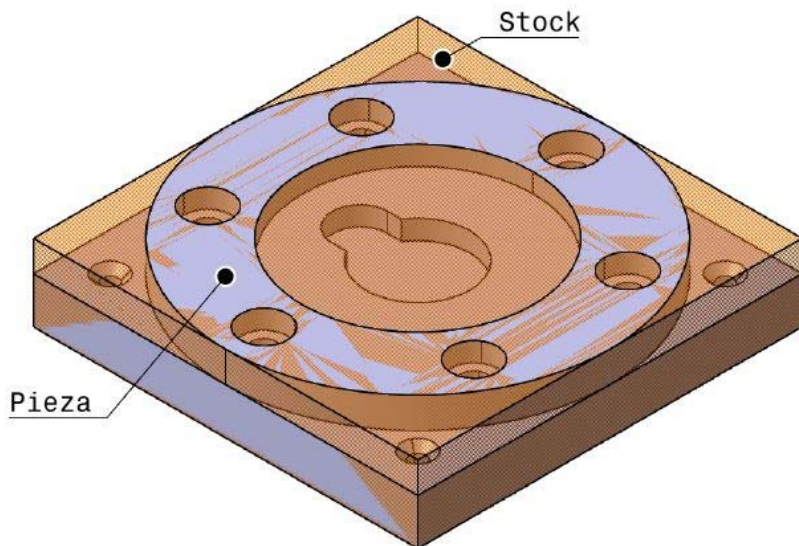
ANEXO 2

Planes de manufactura **Familia 2**

M3_Fam2



Pieza M3_Fam2
 Material: Prisma de Aluminio 6061 de 100m x 100mm x 20 mm



ANEXO 2

Planes de manufactura **Familia 2**

M3_Fam2

SHOP FLOOR DOCUMENTATION M3_Fam2.CATProcess

Part operation : Part Operation.1

Manufacturing Program.1

Tool Change.1
Type : Tool Change



Tool : T1 Face Mill D 50
type : Face Mill

Facing.1
Type : Facing



Tool : T1 Face Mill D 50
type : Face Mill

Tool Change.2
Type : Tool Change



Tool : T2 End Mill D 12
type : End Mill

Pocketing.13
Type : Pocketing



Tool : T2 End Mill D 12
type : End Mill

Tool Change.3
Type : Tool Change



Tool : T3 End Mill D 10
type : End Mill

Pocketing.2
Type : Pocketing



Tool : T3 End Mill D 10
type : End Mill

Pocketing.3
Type : Pocketing



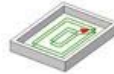
Tool : T3 End Mill D 10
type : End Mill

ANEXO 2

Planes de manufactura **Familia 2**

M3_Fam2

[Pocketing.4](#)
Type : Pocketing



Tool : [T3 End Mill D 10](#)
type : End Mill

[Pocketing.5](#)
Type : Pocketing



Tool : [T3 End Mill D 10](#)
type : End Mill

[Tool Change.4](#)
Type : Tool Change



Tool : [T4 End Mill D 8](#)
type : End Mill

[Pocketing.6](#)
Type : Pocketing



Tool : [T4 End Mill D 8](#)
type : End Mill

[Tool Change.5](#)
Type : Tool Change



Tool : [T5 End Mill D 6](#)
type : End Mill

[Pocketing.7](#)
Type : Pocketing



Tool : [T5 End Mill D 6](#)
type : End Mill

[Pocketing.8](#)
Type : Pocketing



Tool : [T5 End Mill D 6](#)
type : End Mill

[Pocketing.9](#)
Type : Pocketing



Tool : [T5 End Mill D 6](#)
type : End Mill

ANEXO 2

Planes de manufactura **Familia 2**

M3_Fam2

[Pocketing.10](#)
Type : Pocketing



Tool : [T5 End Mill D 6](#)
type : End Mill

[Pocketing.11](#)
Type : Pocketing



Tool : [T5 End Mill D 6](#)
type : End Mill

[Pocketing.12](#)
Type : Pocketing



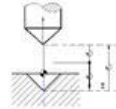
Tool : [T5 End Mill D 6](#)
type : End Mill

[Tool Change.6](#)
Type : Tool Change



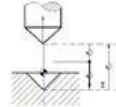
Tool : [T6 Spot Drill D 5](#)
type : Spot Drill

[Spot Drilling.1](#)
Type : Spot Drilling



Tool : [T6 Spot Drill D 5](#)
type : Spot Drill

[Spot Drilling.2](#)
Type : Spot Drilling



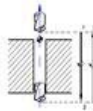
Tool : [T6 Spot Drill D 5](#)
type : Spot Drill

[Tool Change.7](#)
Type : Tool Change



Tool : [T7 Drill D 4.134](#)
type : Drill

[Drilling.1](#)
Type : Drilling



Tool : [T7 Drill D 4.134](#)
type : Drill

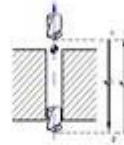
ANEXO 2
Planes de manufactura **Familia 2**
M3_Fam2

Tool Change.8
Type : Tool Change



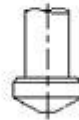
Tool : **T8 Drill D 6.648**
type : Drill

Drilling.2
Type : Drilling



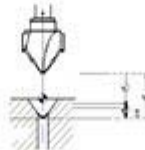
Tool : **T8 Drill D 6.648**
type : Drill

Tool Change.9
Type : Tool Change



Tool : **T9 Countersink D8**
type : Countersink

Counter Sinking.1
Type : Counter Sinking



Tool : **T9 Countersink D8**
type : Countersink

Program cutting time : 1h 3' 17"

Program total time : 1h 7' 38"

ANEXO 3

SCL para Falla por eventos

Bloqueo por falla 1

```
USER_ATTRIB
    fail_count : Real
    VAR
        proc_id : Process
        the_part : Part

procedure myproc()

begin
    the_part = Cil_Machining
    require part the_part
    proc_id = get_process('ProcessCil')
    work sample_cycle_time(proc_id)
    celem->fail_count = celem->fail_count + 1
    if (celem->fail_count == 10) then
        fail 0,60
        celem->fail_count = 0
    endif
    pass()
end
```

```
USER_ATTRIB
    fail_count : Real
    VAR
        proc_id : Process
        the_part : Part

procedure myproc()

begin
    the_part = Cil_Machining
    require part the_part
    proc_id = get_process('ProcessPrisma')
    work sample_cycle_time(proc_id)
    celem->fail_count = celem->fail_count + 1
    if (celem->fail_count == 10) then
        fail 0,60
        celem->fail_count = 0
    endif
    pass()
end
```

ANEXO 4

Condiciones de corte ideales para Fresado y Torneado Fuente: Sandvik Datos de Velocidad de corte, avance y profundidad

Cutting data recommendations

	Material		Cutting speed v_c m/min		Cutting depth a_p or a_e	Feed per tooth, f_z (mm/z)							
						Insert diameter							
	CMC No	HB	P10A	P20A		8	10	12	16	20	25	30	32
P	Unalloyed steel		300-500 250-450	150-375 125-340	0.07x D_c	0.15-0.20	0.15-0.20	0.15-0.20	0.20-0.25	0.20-0.25	0.25-0.30	0.25-0.30	0.25-0.30
	01.1	125											
	01.2	150											
P	Low alloy steel		200-400 180-330	100-300 80-200	0.05x D_c	0.10-0.15	0.10-0.15	0.15-0.20	0.20-0.25	0.20-0.25	0.25-0.30	0.25-0.30	0.25-0.30
	02.1	175											
	02.2	330											
	High alloy steel		200-330	100-230	0.05x D_c	0.10-0.15	0.10-0.15	0.15-0.20	0.20-0.25	0.20-0.25	0.25-0.30	0.25-0.30	0.25-0.30
	03.11	200											
M	Stainless steel		150-200 120-170	100-200 80-120	0.05x D_c	0.10-0.15	0.10-0.15	0.15-0.20	0.15-0.20	0.15-0.20	0.20-0.25	0.20-0.25	0.20-0.25
	05.11	200											
	05.21	200											
K	Malleable cast iron		200-450 300-450	130-330 100-330	0.10x D_c	0.15-0.20	0.15-0.20	0.20-0.25	0.25-0.30	0.25-0.30	0.30-0.35	0.30-0.35	0.30-0.35
	07.1	130											
		07.2	230										
	Grey cast iron		200-400	100-300	0.10x D_c	0.15-0.20	0.15-0.20	0.20-0.25	0.25-0.30	0.25-0.30	0.30-0.35	0.30-0.35	0.30-0.35
Nodular cast iron		400-500 200-350	150-350 100-260	0.07x D_c	0.15-0.20	0.15-0.20	0.20-0.25	0.25-0.30	0.25-0.30	0.30-0.35	0.30-0.35	0.30-0.35	
	09.1	160											
	09.2	250											
N	Aluminium		1000	1000	0.15x D_c	0.20-0.25	0.20-0.25	0.25-0.30	0.30-0.35	0.30-0.35	0.35-0.40	0.35-0.40	0.35-0.40
	30.22	90											
S	Heat resistant alloys		40-80	20-60	0.03x D_c	0.10-0.15	0.10-0.15	0.15-0.20	0.15-0.20	0.15-0.20	0.20-0.25	0.20-0.25	0.20-0.25
	20.22	350											
S	Titanium alloys		70-120	35-90	0.03x D_c	0.15-0.20	0.15-0.20	0.20-0.25	0.25-0.30	0.25-0.30	0.30-0.35	0.30-0.35	0.30-0.35
	23.22	350											
H	Hardened steel		150-250 90-150	75-190 40-110	0.03x D_c	0.10-0.15	0.10-0.15	0.15-0.20	0.20-0.25	0.20-0.25	0.25-0.30	0.25-0.30	0.25-0.30
	04	55 HRC											
	04	63 HRC											

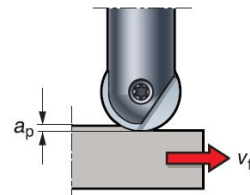
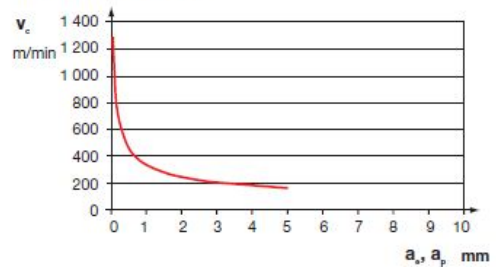
Note: 1. $f_z = 2 \times f_p$
2. When using periphery of insert, reduce the feed by 50%.

Calculo de Velocidades (RPM) Fresado

La velocidad de corte de una fresa es la distancia en pies por minuto o metros por minuto que debe recorrer la periferia de la fresa al cortar determinado metal.

Material	Fresas de acero de alta velocidad HSS		Fresas de carburo	
	Pies/min	m/min	Pies/min	m/min
Acero de máquina	70 - 100	21 - 30	150 - 250	45 - 75
Acero de herramientas	60 - 70	18 - 20	125 - 200	40 - 60
Hierro Fundido	50 - 80	15 - 25	125 - 200	40 - 60
Bronce	65 - 120	20 - 35	200 - 400	60 - 120
Aluminio	500 - 1000	150 - 300	1000 - 2000	150 - 300

Compensated cutting speed, v_c , due to low a_p or a_e



ANEXO 5

Consideraciones para el desgaste de herramienta: Sandvik Efecto de la Velocidad de corte, avance y profundidad en la vida de herramientas

Vida de la herramienta

Si se observan los tres parámetros principales, velocidad, avance y profundidad de corte, cada uno de ellos tiene un efecto distinto sobre la duración de la herramienta. La profundidad de corte es el que tiene un efecto más limitado seguido de la velocidad de avance. La velocidad de corte es el que tiene un efecto más notorio sobre la duración de la plaquita.

Para conseguir una duración de la herramienta óptima: maximice a_p para reducir el número de pasadas, maximice f_n para reducir el tiempo de mecanizado, reduzca v_c para mejorar la duración de la herramienta.

Efectos de la profundidad de corte

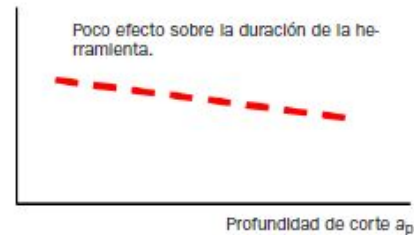
Demasiado superficial

- Pérdida de control de viruta
- Vibraciones
- Calor excesivo
- Poco económico.

Demasiado profundo

- Alto consumo de energía
- Rotura de la plaquita
- Incremento de fuerzas de corte.

Vida de la herramienta



Efectos de la velocidad de avance

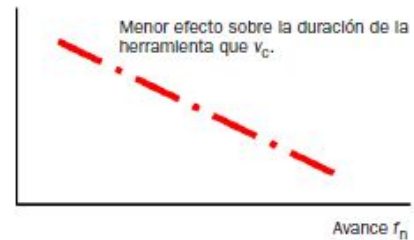
Demasiado baja

- Viruta fibrosa
- Rápido desgaste en incidencia
- Filo de aportación
- Poco económico.

Demasiado elevada

- Pérdida de control de viruta
- Acabado superficial deficiente
- Cráteres de desgaste/deformación plástica
- Alto consumo de energía
- Virutas soldadas
- Martillado de las virutas.

Vida de la herramienta



Efectos de la velocidad de corte

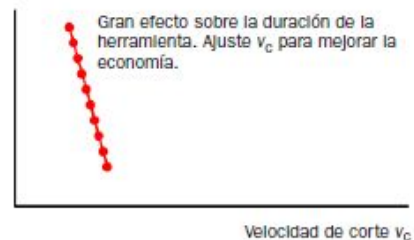
Demasiado baja

- Filo de aportación
- Embotamiento del filo
- Poco económico
- Superficie deficiente.

Demasiado alta

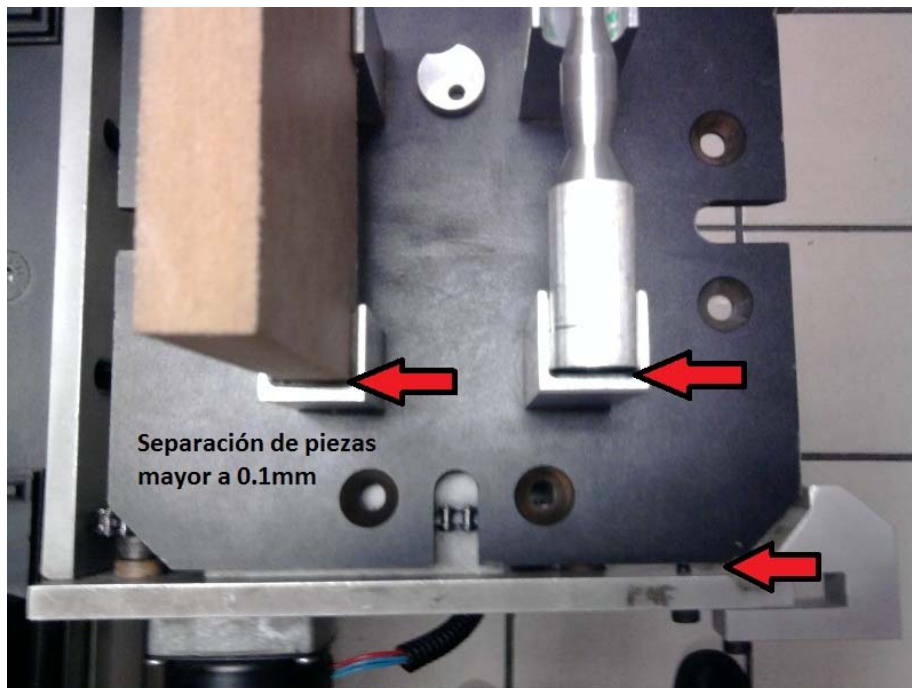
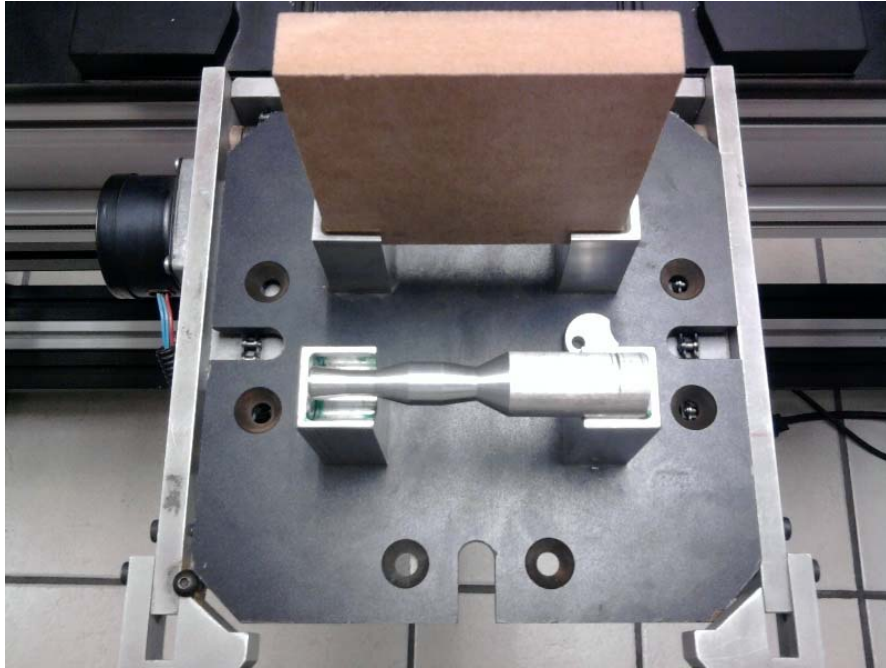
- Rápido desgaste en incidencia
- Acabado deficiente
- Rápida formación de cráteres de desgaste
- Deformación plástica.

Vida de la herramienta



ANEXO 6

Fotos de puntos de sujeción y transporte sujetos a fallas
Plataformas y Vagones



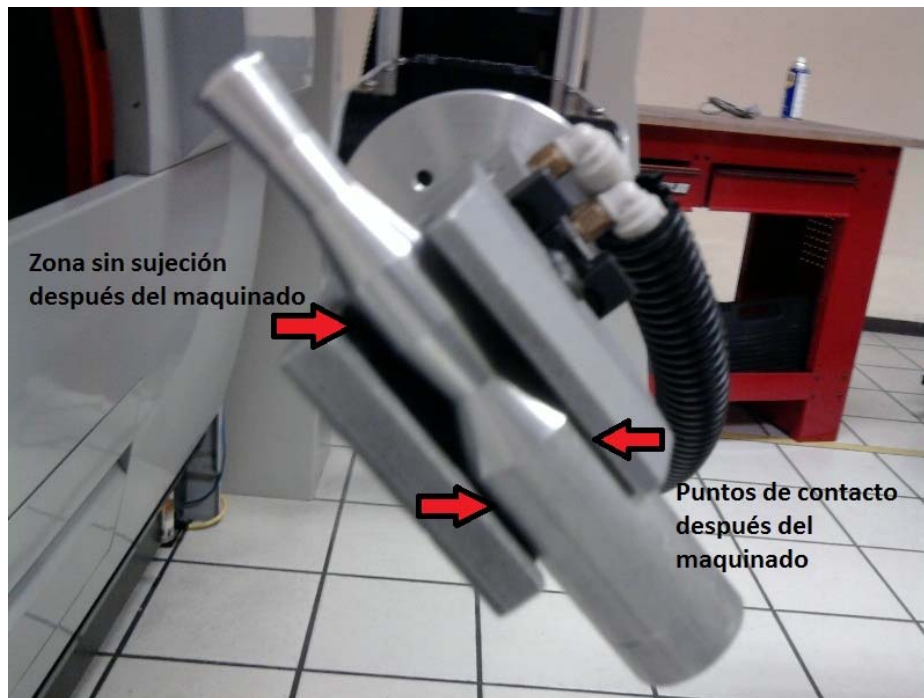
ANEXO 6

Fotos de puntos de sujeción y transporte sujetos a fallas
Topes y guías de ajuste de posición de vagones en el almacén



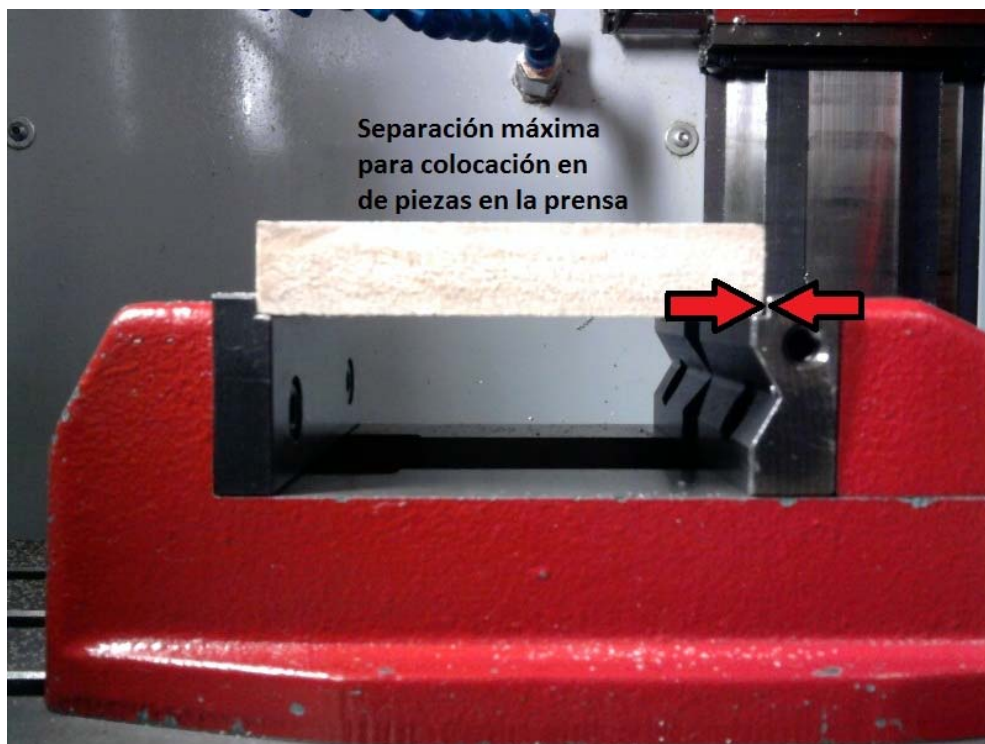
ANEXO 6

Fotos de puntos de sujeción y transporte sujetos a fallas
Zonas sin sujeción y puntos de contacto después de la fabricación en Torno



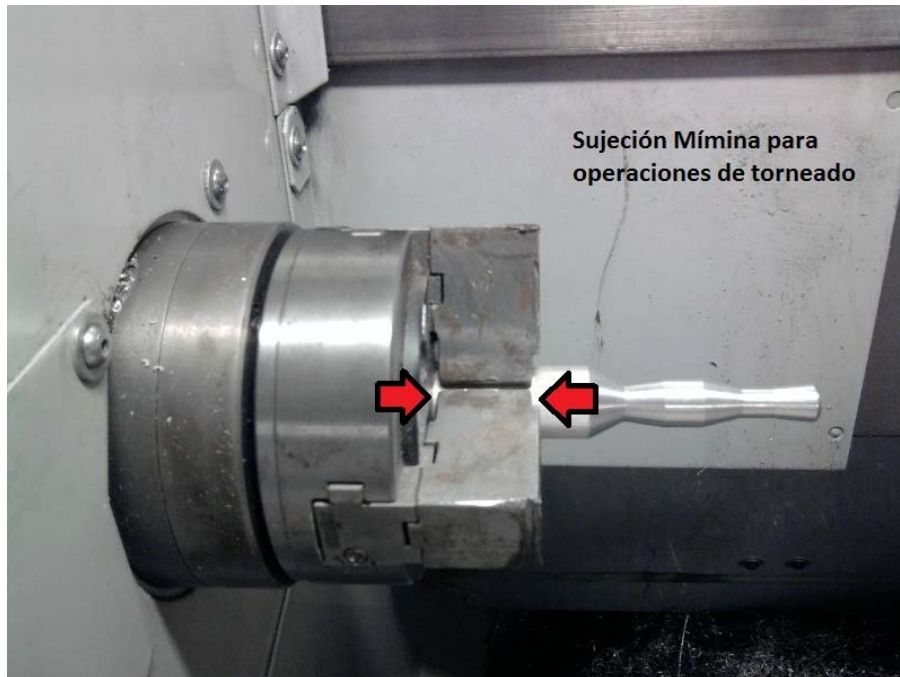
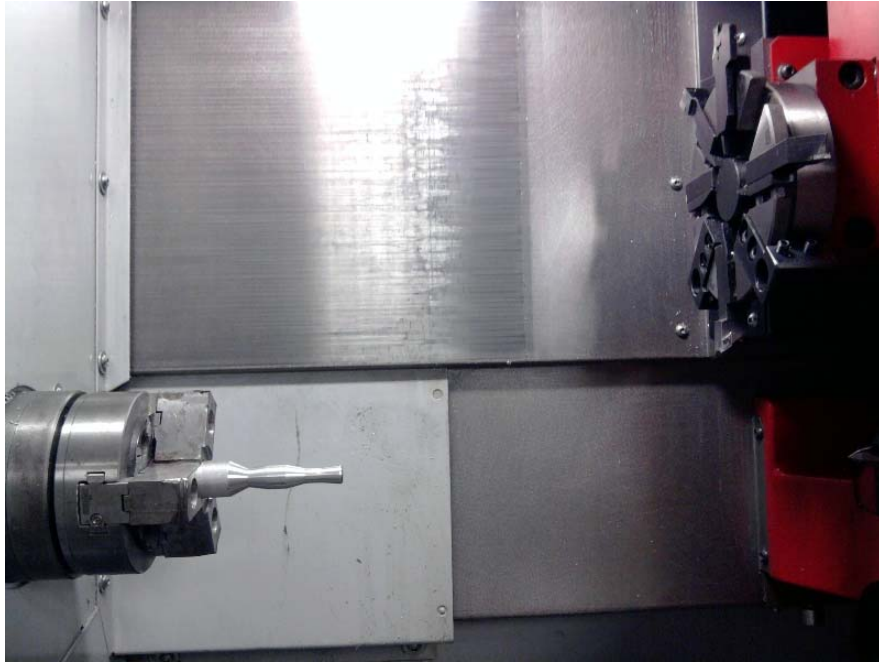
ANEXO 6

Fotos de puntos de sujeción y transporte sujetos a fallas
Separación máxima para colocación en piezas en prensa



ANEXO 6

Fotos de puntos de sujeción y transporte sujetos a fallas
Sujeción mínima para operaciones de torneado



ANEXO 7
 Reporte de la corrida sin fallas del FMS virtual
 Reporte en QUEST®

QUEST Current Run Summary Report

Model : FMSUPAEP_lotelp_sinfallas.mdl
 Model Dir : C:/deneb/QUESTlib/MODELS/
 User : ELebano

Length Units : mm
 Time Units : sec

Simulation Time : 28800.00000
 Warmup Time : 0.00000
 Statistics Collection Time : 28800.00000

Model Summary

Title	Name	Value
Stat Collection Time	-	28800.000
Min Util Element	Conveyor1_1	0.000
Max Util Element	Machine2_1	71.282
Max Repairs	-	0.000
Max Failure Time	-	0.000
Max Part Created	Cilindro	15.000
Max Part Consumed	Cilindro	8.000
Max Residence Time	Cilindro	17562.439
Max Part Source	Source1_1	30.000
Total Parts Created	-	47.000
Total Parts Consumed	-	32.000

- [Part Classes](#)
- [Processes](#)

[Cycle Process](#)

[Unload Process](#)

- [Element Types](#)

[Source](#)
[AGV](#)

[Sink](#)
[AGV_Dec_Pt](#)

[Buffer](#)
[Sub_Resource](#)

[Machine](#)

[Conveyor](#)

- [Failures](#)

Source

Name	State Times		Created Parts	Creation Rate
	Blocked - Wait Block			
Source1_1	28800.000		30	0.001

Sink

Name	State Times		Finished Parts
	Idle		
Sink1_1	28800.000		16

Buffer

Name	State Times		Max. Buffer Length	Avg. Buffer Length	Avg. Part Residence Time	No. of Entries	Max. Wait Time	Min. Wait Time	Zero Wait Entries	Final Content
	Idle	Busy - Processing								
Buffer1_1	0.000	28800.000	10	5.554	7392.900	30	17788.123	1.000	0	10
Buffer2_1	28800.000	0.000	1	0.000	0.000	8	0.000	0.000	9	0
Buffer3_1	28784.000	16.000	1	0.001	1.000	16	1.000	1.000	0	0
Buffer4_1	28800.000	0.000	1	0.000	0.000	9	0.000	0.000	9	0

Machine

Name	State Times				Utilization (%)	Avg. Process Time	Parts Added	Parts Rejected	No. of Products	Avg. Cycle Time	Avg. Requirement Time	Production Rate	Avg. Part Residence Time	Final Content
	Idle	Busy - Processing	Busy - Unloading	Blocked - Wait Block										
Machine1_1	25803.064	2996.936	0.000	0.000	10.406	3420.688	8	0	8	374.617	3046.071	0.000	187.308	0
Machine2_1	8270.855	20529.145	0.000	0.000	71.282	3339.925	9	0	8	2440.120	918.984	0.000	1220.060	1
Machine3_1	28651.885	148.116	0.000	0.000	0.514	3065.687	29	0	9	16.457	3049.230	0.000	2049.240	2
Machine	6126.8	9.000	0.000	22664.	0.031	681.7	27	0	27	1.000	680.7	0.001	828.31	1

e4_1	94			105		66					66		1	
Machin e5_1	28784. 000	8.000	8.000	0.000	0.028	3436. 508	25	0	8	1.000	3435. 508	0.000	1304.9 67	1
Machin e6_1	28663. 088	136.91 2	0.000	0.000	0.475	3446. 381	24	0	24	17.11 4	3429. 267	0.001	5.705	0

Conveyor

Name	State Times			Utilization (%)	Avg. Load	No. of Entries	Avg. Part Residence Time	Transport Rate	Final Content
	Busy - Processing	Busy - Loading	Busy - Empty Travel						
Conveyor1_1	358.387	82.800	28358.813	0.000	0.015	8	55.148	0.000	0
Conveyor2_1	405.665	93.150	28301.186	0.000	0.017	9	55.424	0.000	0

AGV

Name	State Times							Utilization (%)	Avg. Part Residence Time	No. of Parts Added	Avg. Contents	Distance Travelled	Final Content
	Idle	Idle - Parked	Busy - Loading	Busy - Unloading	Busy - Loaded Travel	Busy - Empty Travel	Blocked - Depart Requirement Block						
AGV1_1	76.936	1182.094	1846.432	1905.466	233.864	29.128	23526.080	7.324	120.781	33	0.138	43368.047	0

AGV_Dec_Pt

Name	Utilization (%)	No. of Vehicles Visited	Avg. Vehicle Time	Claim Utilization	Claim Busy Time	Total AGVs Claimed	Avg. Claim Wait Content	Avg. Claim Wait Time	Num AGVs Waited to Claim	Num AGVs Claimed with No Wait
AGV_Dec_Pt1_1	3.254	17	55.134	3.498	1007.342	25	0.000	0.000	0	25
AGV_Dec_Pt3_1	13.507	8	486.258	13.709	3948.103	8	0.000	0.000	0	8
AGV_Dec_Pt4_1	7.406	16	133.306	7.751	2232.353	24	0.000	0.000	0	24
AGV_Dec_Pt2_1	74.655	9	2553.448	74.845	21555.361	9	0.000	0.000	0	9

Sub_Resource

Name	State Times	Utilization (%)	Avg. Part Residence Time	Current Content
	Idle			

Sub_Resource1_1	28800.000	0.000	0.000	0
-----------------	-----------	-------	-------	---

Part Classes

Name	Max. Residence	Min. Residence	Avg. Residence	Created Parts	Destroyed Parts	Parts in System
Cilindro	17562.439	2895.046	11474.156	15	8	7
Cil_Machinig	233.250	174.223	198.969	8	8	0
Prisma	16916.338	2295.148	10863.484	15	8	7
Pris_Machinig	935.473	713.856	809.642	8	8	0
Pallet	0.000	0.000	0.000	1	0	1

Cycle Process

Name	Element	Exec. Count	Avg. Cycle Time	Avg. Proc. Time	Avg. Reqmt. Time	Avg. Part Reqmt. Time	Avg. Labor Reqmt. Time	Avg. AGV Reqmt. Time	Avg. SR Reqmt. Time	Abort Count	Rejection Count	Pause Count	Avg. Pause Time
ProcessPrisma	Machine2_1	8	2440.120	3339.925	918.984	918.984	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
ProcessCil	Machine1_1	8	374.617	3420.688	3046.071	3046.071	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
Pack	Machine3_1	9	16.457	3065.687	3049.230	3049.230	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
Unpack	Machine4_1	9	1.000	681.766	680.766	680.766	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
PackMachinig	Machine5_1	8	1.000	3436.508	3435.508	3435.508	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
UnpackMachinig	Machine6_1	8	17.114	3446.381	3429.267	3429.267	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000

Unload Process

Name	Element	Exec. Count	Avg. Proc. Time	Avg. Reqmt. Time	Avg. Part Reqmt. Time	Avg. Labor Reqmt. Time	Avg. AGV Reqmt. Time	Avg. SR Reqmt. Time	Abort Count	Rejection Count	Pause Count	Avg. Pause Time
UnloadProcess	Buffer1_1	11	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
UnloadCell	Machine5_1	8	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
	Buffer3_1	16	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
	Overall	24	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0.000	

ANEXO 8

Reporte de la corrida con fallas probabilísticas del FMS virtual
Reporte en QUEST®

QUEST Current Run Summary Report

```

Model       : FMSUPAEP_lotelp_confallasProb.mdl
Model Dir   : C:/deneb/QUESTlib/MODELS/
User        : ELebano
  
```

```

Length Units : mm
Time Units    : sec
  
```

```

Simulation Time      : 28800.00000
Warmup Time          : 0.00000
Statistics Collection Time : 28800.00000
  
```

Model Summary

Title	Name	Value
Stat Collection Time	-	28800.000
Min Util Element	Conveyor1_1	0.000
Max Util Element	Machine2_1	56.712
Max Repairs	AGV1_1	51.000
Max Failure Time	-	0.000
Max Part Created	Cilindro	10.000
Max Part Consumed	Cilindro	5.000
Max Residence Time	Cilindro	25993.818
Max Part Source	Source1_1	20.000
Total Parts Created	-	31.000
Total Parts Consumed	-	20.000

- [Part Classes](#)
- [Processes](#)

[Cycle Process](#)

[Unload Process](#)

- [Element Types](#)

[Source](#)
[AGV](#)

[Sink](#)
[AGV_Dec_Pt](#)

[Buffer](#)
[Sub_Resource](#)

[Machine](#)

[Conveyor](#)

- [Failures](#)

Source

Name	State Times		Created Parts	Creation Rate
	Blocked - Wait Block			
Source1_1	28800.000		20	0.001

Sink

Name	State Times		Finished Parts
	Idle		
Sink1_1	28800.000		10

Buffer

Name	State Times		Max. Buffer Length	Avg. Buffer Length	Avg. Part Residence Time	No. of Entries	Max. Wait Time	Min. Wait Time	Zero Wait Entries	Final Content
	Idle	Busy - Processing								
Buffer1_1	0.000	28800.000	10	5.964	6900.229	20	16272.824	1.000	0	6
Buffer2_1	28800.000	0.000	1	0.000	0.000	5	0.000	0.000	6	0
Buffer3_1	28790.000	10.000	1	0.000	1.000	10	1.000	1.000	0	0
Buffer4_1	28800.000	0.000	1	0.000	0.000	6	0.000	0.000	6	0

Machine

Name	State Times					Number of Repairs	Utilization (%)	Avg. Process Time	Parts Added	Parts Rejected	No. of Products	Avg. Cycle Time	Avg. Reqmt Time	Production Rate	Avg. Part Residence Time	Final Content
	Idle	Busy - Processing	Busy - Unloading	Blocked - Wait Block	Unavailable - Failed											
Machin e1_1	25325.201	1795.146	0.000	37.349	1642.304	6	6.233	4863.981	5	0	5	359.029	4504.952	0.000	183.250	0
Machin e2_1	6553.055	16333.133	0.000	0.000	5913.813	17	56.712	3830.284	6	0	5	2864.199	1092.176	0.000	1958.246	1
Machin e3_1	28512.688	94.508	0.000	0.000	192.805	1	0.328	4402.563	20	0	6	15.751	4386.811	0.000	2961.659	2
Machin e4_1	5010.814	6.000	0.000	23783.186	0.000	0	0.021	836.136	18	0	18	1.000	835.136	0.001	1286.498	1
Machin e5_1	28790.000	5.000	5.000	0.000	0.000	0	0.017	5303.691	16	0	5	1.000	5302.691	0.000	2008.059	1
Machin e6_1	28085.666	72.272	0.000	0.000	642.062	3	0.251	5190.098	15	0	15	14.454	5175.644	0.001	4.818	0

Conveyor

Name	State Times	Utilization (Avg.	No. of	Avg. Part	Transport	Final
------	-------------	---------------	------	--------	-----------	-----------	-------

	Busy - Processing	Busy - Loading	Busy - Empty Travel	%)	Load	Entries	Residence Time	Rate	Content
Conveyor1_1	223.992	51.750	28524.258	0.000	0.010	5	55.148	0.000	0
Conveyor2_1	270.444	62.100	28467.457	0.000	0.012	6	55.424	0.000	0

AGV

Name	State Times								Number of Repairs	Utilization (%)	Avg. Part Residence Time	No. of Parts Added	Avg. Contents	Distance Traveled	Final Content
	Idle	Idle - Parked	Busy - Loading	Busy - Unloading	Busy - Loaded Travel	Busy - Empty Travel	Blocked - Depart Requirement Block	Unavailable - Failed							
AGV1_1	30.164	644.574	1141.397	1261.906	148.450	18.808	16508.287	9046.413	51	4.544	207.170	21	0.151	27477.457	0

AGV_Dec_Pt

Name	Utilization (%)	No. of Vehicles Visited	Avg. Vehicle Time	Claim Utilization	Claim Busy Time	Total AGVs Claimed	Avg. Claim Wait Content	Avg. Claim Wait Time	Num AGVs Waited to Claim	Num AGVs Claimed with No Wait
AGV_Dec_Pt1_1	2.848	11	74.561	3.002	864.558	16	0.000	0.000	0	16
AGV_Dec_Pt3_1	10.009	5	576.495	10.135	2918.748	5	0.000	0.000	0	5
AGV_Dec_Pt4_1	7.790	10	224.357	8.006	2305.729	15	0.000	0.000	0	15
AGV_Dec_Pt2_1	78.283	6	4099.607	78.410	22582.094	6	0.000	0.000	0	6

Sub_Resource

Name	State Times	Utilization (%)	Avg. Part Residence Time	Current Content
	Idle			
Sub_Resource1_1	28800.000	0.000	0.000	0

Part Classes

Name	Max. Residence	Min. Residence	Avg. Residence	Created Parts	Destroyed Parts	Parts in System
Cilindro	25993.818	5621.636	15770.673	10	5	5
Cil_Machinig	598.730	223.067	379.476	5	5	0
Prisma	25065.234	4828.509	15033.126	10	5	5
Pris_Machinig	1527.314	879.883	1117.024	5	5	0
Pallet	0.000	0.000	0.000	1	0	1

Cycle Process

Name	Element	Exec. Count	Avg. Cycle Time	Avg. Proc. Time	Avg. Reqmt. Time	Avg. Part Reqmt. Time	Avg. Labor Reqmt. Time	Avg. AGV Reqmt. Time	Avg. SR Reqmt. Time	Abort Count	Rejection Count	Pause Count	Avg. Pause Time
ProcessPrisma	Machine2_1	5	2864.199	3830.285	1092.176	1092.176	0.000	0.000	0.000	0	0	17	347.871
ProcessCil	Machine1_1	5	359.029	4863.982	4504.952	4504.952	0.000	0.000	0.000	0	0	6	273.717
Pack	Machine3_1	6	15.751	4402.563	4386.811	4386.811	0.000	0.000	0.000	0	0	1	192.805
Unpack	Machine4_1	6	1.000	836.136	835.136	835.136	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
PackMachining	Machine5_1	5	1.000	5303.691	5302.691	5302.691	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
UnpackMachinig	Machine6_1	5	14.454	5190.098	5175.643	5175.643	0.000	0.000	0.000	0	0	3	214.021

Unload Process

Name	Element	Exec. Count	Avg. Proc. Time	Avg. Reqmt. Time	Avg. Part Reqmt. Time	Avg. Labor Reqmt. Time	Avg. AGV Reqmt. Time	Avg. SR Reqmt. Time	Abort Count	Rejection Count	Pause Count	Avg. Pause Time
UnloadProcess	Buffer1_1	8	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
UnloadCell	Machine5_1	5	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
	Buffer3_1	10	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
	Overall	15	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0.000	

Failures

Name	Element	Num. Failures	Avg Time
Failure_Torno	Machine1_1	6	273.717
Failure_Fresadora	Machine2_1	17	347.871
Failure_Gantry	AGV1_1	51	177.381
Failure_Almacen_Bandas	Machine3_1	1	192.805
Failure_Bandas_Almacen	Machine6_1	3	214.021

ANEXO 9

Reporte de la corrida con fallas por eventos del FMS virtual Reporte en QUEST®

QUEST Current Run Summary Report

```

Model       : FMSUPAEP_confallasEventos.mdl
Model Dir   : C:/deneb/QUESTlib/MODELS/
User        : ELebano
  
```

```

Length Units : mm
Time Units   : sec
  
```

```

Simulation Time      : 28800.00000
Warmup Time         : 0.00000
Statistics Collection Time : 28800.00000
  
```

Model Summary

Title	Name	Value
Stat Collection Time	-	28800.000
Min Util Element	Conveyor1_1	0.000
Max Util Element	Machine2_1	67.781
Max Repairs	Machine6_1	7.000
Max Failure Time	-	0.000
Max Part Created	Cilindro	10.000
Max Part Consumed	Prisma	8.000
Max Residence Time	Cilindro	18266.994
Max Part Source	Source1_1	20.000
Total Parts Created	-	36.000
Total Parts Consumed	-	29.000

- [Part Classes](#)
- [Processes](#)

[Cycle Process](#)

[Unload Process](#)

- [Element Types](#)

[Source](#)
[AGV](#)

[Sink](#)
[AGV Dec Pt](#)

[Buffer](#)
[Sub Resource](#)

[Machine](#)

[Conveyor](#)

- [Failures](#)

Source

Name	State Times		Created Parts	Creation Rate
	Blocked - Wait Block			
Source1_1	28800.000		20	0.001

Sink

Name	State Times		Finished Parts
	Idle		
Sink1_1	28800.000		14

Buffer

Name	State Times		Max. Buffer Length	Avg. Buffer Length	Avg. Part Residence Time	No. of Entries	Max. Wait Time	Min. Wait Time	Zero Wait Entries	Final Content
	Idle	Busy - Processing								
Buffer1_1	0.000	28800.000	10	5.489	6671.612	20	14891.466	1.000	0	2
Buffer2_1	28800.000	0.000	1	0.000	0.000	7	0.000	0.000	8	0
Buffer3_1	28785.000	15.000	1	0.001	1.000	15	1.000	1.000	0	0
Buffer4_1	28800.000	0.000	1	0.000	0.000	8	0.000	0.000	8	0

Machine

Name	State Times					Number of Repairs	Utilization (%)	Avg. Process Time	Parts Added	Parts Rejected	No. of Products	Avg. Cycle Time	Avg. Reqmt Time	Production Rate	Avg. Part Residence Time	Final Content
	Idle	Busy - Processing	Busy - Unloading	Blocked - Wait Block	Unavailable - Failed											
Machine1_1	25286.543	2672.160	0.000	0.000	841.297	2	9.278	3445.006	8	0	7	366.616	3160.818	0.000	210.798	1
Machine2_1	8652.618	1952.0963	0.000	0.000	626.420	2	67.781	3424.478	8	0	8	2440.120	984.358	0.000	1259.211	0
Machine3_1	28024.910	127.976	0.000	0.000	647.114	4	0.444	3005.927	26	0	8	15.997	2989.930	0.000	2063.168	2
Machine4_1	6653.865	8.000	0.000	22138.135	0.000	0	0.028	748.162	24	0	24	1.000	747.162	0.001	923.324	0
Machine5_1	28786.000	7.000	7.000	0.000	0.000	0	0.024	3514.033	23	0	7	1.000	3513.033	0.000	1360.301	2

Machine6_1	2736 4.281	121.0 80	0.000	0.000	1314. 638	7	0.420	3355 .720	21	0	21	17.2 97	3338 .423	0.001	5.766	0
------------	---------------	-------------	-------	-------	--------------	---	-------	--------------	----	---	----	------------	--------------	-------	-------	---

Conveyor

Name	State Times			Utilization (%)	Avg. Load	No. of Entries	Avg. Part Residence Time	Transport Rate	Final Content
	Busy - Processing	Busy - Loading	Busy - Empty Travel						
Conveyor1_1	313.588	72.450	28413.961	0.000	0.013	7	55.148	0.000	0
Conveyor2_1	360.591	82.800	28356.609	0.000	0.015	8	55.424	0.000	0

AGV

Name	State Times								Number of Repairs	Utilization (%)	Avg. Part Residence Time	No. of Parts Added	Avg. Contents	Distance Traveled	Final Content
	Idle	Idle - Parked	Busy - Loading	Busy - Unloading	Busy - Loaded Travel	Busy - Empty Travel	Blocked - Departure Requirement Block	Unavailable - Failed							
AGV1_1	76.9 36	1031. 550	1708. 675	1783. 193	219. 840	27.4 08	23660.8 38	291.55 9	1	6.791	129.1 38	31	0.139	40793 .574	0

AGV_Dec_Pt

Name	Utilization (%)	No. of Vehicles Visited	Avg. Vehicle Time	Claim Utilization	Claim Busy Time	Total AGVs Claimed	Avg. Claim Wait Content	Avg. Claim Wait Time	Num AGVs Waited to Claim	Num AGVs Claimed with No Wait
AGV_Dec_Pt1_1	3.006	16	54.101	3.243	933.956	24	0.000	0.000	0	24
AGV_Dec_Pt3_1	15.071	8	532.671	15.273	4398.505	8	0.000	0.000	0	8
AGV_Dec_Pt4_1	7.696	15	147.758	8.014	2307.894	23	0.000	0.000	0	23
AGV_Dec_Pt2_1	73.104	8	2631.751	73.273	21102.762	8	0.000	0.000	0	8

Sub_Resource

Name	State Times	Utilization (%)	Avg. Part Residence Time	Current Content
	Idle			
Sub_Resource1_1	28800.000	0.000	0.000	0

Part Classes

Name	Max. Residence	Min. Residence	Avg. Residence	Created Parts	Destroyed Parts	Parts in System
Cilindro	18266.994	2895.046	11120.412	10	7	3
Cil_Machinig	512.427	174.223	239.681	7	7	0

Prisma	18219.184	2295.148	11429.740	10	8	2
Pris_Machinig	1227.032	713.856	900.273	8	7	1
Pallet	0.000	0.000	0.000	1	0	1

Cycle Process

Name	Element	Exec. Count	Avg. Cycle Time	Avg. Proc. Time	Avg. Reqmt. Time	Avg. Part Reqmt. Time	Avg. Labor Reqmt. Time	Avg. AGV Reqmt. Time	Avg. SR Reqmt. Time	Abort Count	Rejection Count	Pause Count	Avg. Pause Time
ProcessPrisma	Machine2_1	8	2440.120	3424.478	984.358	984.358	0.000	0.000	0.000	0	0	2	313.210
ProcessCil	Machine1_1	7	366.616	3445.006	3160.818	3160.818	0.000	0.000	0.000	0	0	2	420.648
Pack	Machine3_1	8	15.997	3005.927	2989.930	2989.930	0.000	0.000	0.000	0	0	4	161.778
Unpack	Machine4_1	8	1.000	748.162	747.162	747.162	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
PackMachinig	Machine5_1	7	1.000	3514.033	3513.033	3513.033	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
UnpackMachinig	Machine6_1	7	17.297	3355.720	3338.423	3338.423	0.000	0.000	0.000	0	0	6	197.695

Unload Process

Name	Element	Exec. Count	Avg. Proc. Time	Avg. Reqmt. Time	Avg. Part Reqmt. Time	Avg. Labor Reqmt. Time	Avg. AGV Reqmt. Time	Avg. SR Reqmt. Time	Abort Count	Rejection Count	Pause Count	Avg. Pause Time
UnloadProcess	Buffer1_1	10	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
UnloadCell	Machine5_1	7	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
	Buffer3_1	15	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	0.000
	Overall	22	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0.000	

Failures

Failure_Torno	Machine1_1	2	420.648
Failure_Fresadora	Machine2_1	2	313.210
Failure_Gantry	AGV1_1	1	291.559
Failure_Almacen_Bandas	Machine3_1	4	161.778
Failure_Bandas_Almacen	Machine6_1	7	187.805
Failure Class is not associated with any Element Class			

Bibliografía

- [1] APICS. *CPIM, Revised Reprints; Systems and Technologies*; USA; APICS, 1995.
- [2] Aquilano, J., Nicholas. CHASE, B., Richard. *Dirección y Administración de la Producción y de las Operaciones*; Sexta Edición. México; McGraw Hill, 1996.
- [3] ARRIAGA Segundo, Leobardo; *Las máquinas Herramienta con control numérico*; Primera Edición. México; IPN, 1999.
- [4] BEDWORTH D., David. Henderson R., Mark. Wolfe M., Philip. *COMPUTER-INTEGRATED DESIGN AND MANUFACTURING*; New York; McGraw-Hill, Inc., 1990.
- [5] BERNHARDT R. et al. *Integration of Robots into CIM*; Primera Edición. London; Chapman & Hall., 1992.
- [6] COTSFTIS, Michael. Vernadat, Francois. *Advances in Factories of the Future, CIM and Robotics*; Netherlands; Elsevier Science Publishers B.V., 1993.
- [7] CHANG, Tien-Chien. Wysk, A. Richard. Wang, Hsu-Pin. *Computer-Aided Manufacturing*; Segunda Edición. New Jersey; Prentice-Hall, Inc., 1991.
- [8] CHORAFAS N., Dimitris. *Manufacturing Databases and Computer Integrated Systems*; USA; CRC Press, Inc., 1993.
- [9] EAST, Stuart. *SYSTEMS INTEGRATION; A management guide for manufacturing engineers*; London; McGraw-Hill, Inc., 1992.
- [10] ESPRIT Consortium AMICE (Eds.). *CIMOSA; Open System Architecture for CIM*; 2da. Edición. New York; Springer-Verlag, 1993.
- [11] FUCHS H., Jerome. Hannam G., Roger. *The Prentice Hall Illustrated Handbook of Advanced Manufacturing Methods*; New Jersey; Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [12] GREENWOOD R. Nigel. *Implementing Flexible Manufacturing Systems*; New York; John Wiley & Sons, 1988.
- [13] GROOVER, P. Mikell. *Fundamentos de Manufactura Moderna; Materiales, Procesos y Sistemas*; 1ra. Edición. México; Pearson Educación, 1996.
- [14] HAVERMAN F. Mitchell, Jr. *CIM SYSTEMS; An Introduction to Computer-Integrated Manufacturing*; New Jersey; Prentice-Hall, Inc., 1991.
- [15] HELANDER M., Nagamachi M. *Design for Manufacturability; A Systems Approach to Concurrent Engineering and Ergonomics*; London; Taylor & Francis Ltd., 1992.
- [16] HOFFMAN G., Edward. *Jig and Fixture Design*. New York; Delmar Publishers Inc., 1991.

- [17] HORATH, Larry. *Computer Numerical Control Programming Of Machines*; New York; Merrill, 1993.
- [18] JIMÉNEZ Cruz, Jorge. *Introducción al proceso de fresado por control numérico*; Primera Edición. México; IPN, 2000.
- [19] KOCHAN, D. and Olling G. (Edited). *Software for Manufacturing*; North-Holland; Elsevier Science Publishers B.V., 1989.
- [20] LUGGEN W., William. *Flexible Manufacturing Cells and Systems*; New Jersey; Prentice-Hall, Inc., 1991.
- [21] MABERT A., Vincent. Jacobs, F. Robert. *Integrated Production Systems; Design, Planning, Control, and Scheduling*; Cuarta Edición. Norcross, Georgia; IEMP, IIE., 1991.
- [22] MAKAROV M.I. *Modeling of Robotic and Flexible Manufacturing Systems*; USA; Hemisphere Publishing Corporation., 1990.
- [23] MASIP Ferré, Rafael. *La Fábrica Flexible*; Barcelona; Marcombo, S.A., 1988.
- [24] McGUIGAN, Kevin. *Flexible Manufacturing; For Small to medium enterprises*; Oxford; EOLAS, 1988.
- [25] MELNYKA A., Steven. Narasimhan, Ram. *Computer Integrated Manufacturing; Guidelines and Applications From Industrial Leaders*; Illinois; Business one Irwin, 1991.
- [26] NARASIMHAN, Sim. et all. *Planeación de la Producción y Control de Inventarios*; Segunda edición. Prentice-Hall, Inc. 1995.
- [27] OLMSTED, Barney. Smith, Suzanne. *Creating a Flexible Workplace: How to Select and Manage Alternative Work Options*; New York; AMACOM, 1989.
- [28] OLLING G. J., Kimara F. *Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing*; Netherlands; Elsevier Science Publishers B.V., 1992.
- [29] REITER-SHOLZ B. *CIM Interfaces; Concepts, standards and problems of interfaces in CIM*; Primera Edición. Ner York; Van Nostrand Reinhold Inc., 1992.
- [30] REZA A., Maleki. *Flexible Manufacturing Systems; The Technology and Management*. New Jersey; Prentice-Hall, Inc., 1991.
- [31] RICHARD K., Miller, Terri C., Walker. *FMS/CIM Systems Integration Handbook*; Lilburn, GA; The Fairmont Press, Inc., 1987.
- [32] RODD G., Michael. Deravi, Farzin. *Communication Systems for Industrial Automation*; Primera Edición. UK; Prentice-Hall International, 1989.

- [33] SHEER A-W; *CIM; Towards the Factory of the Future*; New Jersey; Springer-Verlang, 1991.
- [34] *Sistemas CAD/CAM/CAE; Diseño y Fabricación por Computadora*; México; Publicaciones Marcombo S.A. 1988.
- [35] SULE, R. Dileep. *Instalaciones de Manufactura; Ubicación, Planeación y Diseño*; Segunda Edición. México; Thomson Learning, 2001.
- [36] TALAVAGE, Joseph. Hannam G., Roger. *FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS IN PRACTICE; Applications, Design, and Simulation*; USA; Marcel Dekker, Inc., 1988.
- [37] TEMPELMEIER, Horst. Kuhn, Heinrich. *Flexible Manufacturing Systems, Decision Support for Design and Operation*; New York, John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [38] TIDD, Joseph. *Flexible Manufacturing Technologies and International Competitiveness*; London; Printer Publishers, 1991.
- [39] WALDNER, Jean-Baptiste. *CIM; Principles of Computer-Integrated Manufacturing*; Primera Edición. Chichester; John Wiley & Sons, 1992.
- [40] ZHOU, MengChu, Venkatesh, Kurapati. *Modeling, Simulation and Control of Flexible Manufacturing Systems: A Petri Net Approach*; New Jersey; World Scientific, 1999.
- [41] GROOVER P. Mikell. *Automation, Production Systems, And Computer-Integrated Manufacturing*, Tercera Edición, New Jersey, Pearson - Prentice Hall, 2008
- [42] LAW M. Averill, *Simulation Modeling and Analysis*, Tercera Edición, USA, McGraw Hill, 2000.
- [43] BZYMEK, ZBIGNIEW y NUNEZ MANUEL (2008), *Simulation of a Machining Sequence Using Delmia/ Quest Software*. Computer – Aided Design and Applications. pp. 401-411
- [44] SZWEJCZEWSKI MAREK y COUSENS ALAN (2007), *Increasing flexibility: what are your options?* Management Services.
- [45] MOLINA A., RODRIGUEZ C. A., y RAMIREZ M. (2005). *Next-generation manufacturing systems: key research issues in developing and integrating reconfigurable and intelligent machines*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, vol. 18, pp. 525-536.
- [46] A. RUTH y WIENCLAW A. (2008) *Reconfigurable Manufacturing Systems*. EBSCO Research Starters Academic Topic Overviews. pp. 1-5
- [47] BARROS, TOMAS C. y PERKUSICH, ANGELO. (1997) *A Fault Tolerant Colored Petri Net Model for Flexible Manufacturing Systems*. J. Braz. Comp. Soc. vol. 4 no. 2.

- [48] MCFARLANE, DUNCAN (2009) *Holonic Manufacturing Systems*. Institute for Manufacturing, Department of Engineering, University Cambridge. Disponible en http://www.ifm.eng.cam.ac.uk/automation/research/distributed_intelligent.html
- [49] KELLEN, STEVE. (2003) *Fault tolerance for manufacturing*, disponible en <http://www.automationworld.com/primeres-109>
- [50] BREWER, JASON C. (2004). *Do I have to be flexible?* Automative Industries, Supplier Business. pp.42-43
- [51] CONNAUGHTON, SUE A NN. (2008) *Control of Manufacturing Systems*. EBSCO Research Starters Academic Topic Overviews.
- [52] BRUCCOLERIF MANFREDI, AMICO MICHELE y PERRONEJ GIOVANNI. (2003) *Distributed intelligent control of exceptions in reconfigurable manufacturing systems*. International Journal of Production Research vol. 41, NO. 7, pp. 1393-1412
- [53] R. BARNES, MARTIN (1997). *An Introduction to Quest*. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference, ed. S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, and B. L. Nelson pp. 619-623.
- [54] DAVE RAKESH, GANAPATHY SUBHASHINI, FENDELEY MARY y NARAYANAN S (2004). *A knowledge-based system to model human supervisory control in dynamic planning*. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge - Based Systems. Vol. 12. World Scientific Publishing Company. pp. 1-14.
- [55] DE GROOTE YVES. (2006). *SMED reduces changeover times*. Food engineering & ingredients. pp. 32-34
- [56] BUYURGAN N. y MENDOZA A. (2006). *Performance-based dynamic scheduling model for flexible manufacturing systems*. International Journal of Production Research, Vol. 44, No. 7 pp. 1273–1295
- [57] SHEN WEIMING Y H. NORRIE DOUGLAS. *Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey*. Division of Manufacturing Engineering, The University of Calgary 2500 University Dr. NW, Calgary, Alberta, Canada, pp. 1-22
- [58] LI, Z.1 SHPITALNI, M. (2009). *Smart deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems using Petri nets*. Computers & Applied Sciences Complete.
- [59] SURESH KUMAR, SRIDHARAN, R. (2009) *Simulation modelling and analysis of part and tool flow control decisions in a flexible manufacturing system*. Robotics & Computer-Integrated Manufacturing; Aug2009, Vol. 25 Issue 4/5, p829-838, 10p
- [60] HE, PING Y XU, XIAOYAN (2009) *Improving process flexibility through products assignment with bill of material constraints*. Robotics & Computer-Integrated Manufacturing; Jun2009, Vol. 25 Issue 3, p582-588, 7p

[61]CHANG, AN-YUAN.(2009) *An attribute approach to the measurement of machinegroup flexibility*. European Journal of Operational Research; May2009, Vol. 194 Issue 3, p774-786, 13p

[62] BONGAERTS, 1998, “Integration of Scheduling and Control in Holonic Manufacturing Systems”, Ph.D. Thesis PMA/K.U.Leuven, Chapter 4. Disponible en <http://www.mech.kuleuven.be/goa/concepts.htm>