



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE CAJEME

**Diseño de una metodología para la
automatización de sistemas productivos
seriales utilizando modelos discretos**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA MECATRÓNICA**

PRESENTA

FERRER MANUEL LAGUNES GARCÍA

ASESOR DE CONTENIDO:

DR. FRANCISCO JAVIER OCHOA ESTRELLA

CO-ASESOR DE CONTENIDO:

DR. EUSEBIO JIMÉNEZ LÓPEZ

Dedicatorias

Dedico esta tesis a mis padres por haberme forjado como la persona que soy, mucho de mis logros se los debo a ellos. A Andrea Flores la cual siempre me ha motivado constantemente para alcanzar todos mis objetivos y creer en mí.

Agradecimientos

Quiero agradecer profundamente a cada una de esas personas que, con su apoyo incondicional, su paciencia, su cariño y confianza hicieron que pudiera lograr mis metas. Especial reconocimiento a mis padres, por ser quienes confiaron en mí, me inculcaron valores y que me han apoyado toda mi vida. A mis compañeros de maestría de los cuales he aprendido muchas cosas y nos hemos ayudado en todo lo que hemos necesitado. A mi asesor Dr. Francisco Javier Ochoa Estrella y mi co-asesor Dr. Eusebio Jiménez por sus grandes enseñanzas y toda su disponibilidad. Un profundo agradecimiento a Andrea Flores, una maravillosa persona, que siempre me ha brindado todo su apoyo y comprensión, de la cual he aprendido mucho y me ha motivado a seguir adelante. Por último, a todos los maestros y doctores de la maestría en ITESCA que me dieron grandes enseñanzas.

Resumen

En este trabajo de tesis se presenta el diseño y desarrollo de una metodología para la automatización de sistemas productivos seriales utilizando modelos discretos. En el cual se tomó como base la metodología para la planeación, sincronización y la automatización de sistemas productivos seriales propuesta por el Dr. Eusebio Jiménez, profundizándola y extendiéndola hasta llegar a la parte de la automatización y el sensado robusto.

El análisis se realizó desde el proceso de medición sistemática de la pieza hasta la construcción de las ecuaciones de estado que gobiernan la operación de un Programmable Logic Controller (PLC). Se estudiaron los elementos que componen la celda de manufactura flexible iCIM 3000 y la hoja de proceso para seleccionar la maquinaria y el flujo de operación con la cual se fabricará la pieza. Con los tiempos de procesos y la distribución de planta se procedió realizar la sincronización local y global del sistema productivo, para después aplicar la automatización con los modelos discretos y así obteniendo las ecuaciones de estado del diagrama escalera como resultado de la metodología.

Abstract

This thesis work presents the design and development of a methodology for the automation of serial production systems using discrete models. In which the methodology for the planning, efficiency and automation of serial production systems proposed by Dr. Eusebio Jiménez was taken as a basis, deepening and extending it until reaching the part of automation and robust sensing.

The analysis was carried out from the process of systematic measurement of the part to the construction of the state operations that govern the operation of a Programmable Logic Control (PLC). The elements that make up the iCIM 3000 flexible manufacturing cell and the process sheet were studied to select the machinery and the operation flow with which the part will be manufactured. With the process times and the plant distribution, the local and global sound of the productive system was carried out, to later apply the automation with the discrete models and thus obtain the equations of state of the ladder diagram as a result of the methodology.

Índice general

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN	10
1.1. Antecedentes	10
1.2. Planteamiento del problema	19
1.3. Justificación.....	20
1.4. Objetivos	20
1.6. Alcances y delimitaciones.....	21
1.6.1. Alcances	21
1.6.2. Delimitaciones.....	21
CAPITULO II - MARCO TEÓRICO	22
2.1. Aspectos generales de la Automatización de Procesos	22
2.1.1. Automatización industrial	22
Ventajas y beneficios	23
2.1.2. Jerarquía de un sistema de automatización	23
2.1.3. Tipos de sistemas de automatización de procesos industriales	25
1) Automatización fija.....	25
2) Automatización programable	25
3) Automatización flexible	25
2.2 Celdas de manufactura	26
2.2.1 Definición.....	26
2.2.2. Ejemplos de celdas de manufactura	26
2.2.3. Flexibilidad de las celdas de manufactura.....	30
2.3. El concepto del CIM	31
2.4 Manufactura Sincronizada.....	33
2.4.1. El método DBR	34
2.5 Modelos de sincronización.....	35
2.6. Sistemas discretos	36
2.6.1. Sistemas y modelos	36
2.6.2. Definición.....	37
2.7. Elementos de monitoreo.....	38
2.7.1. Monitoreo	38
2.7.2. Elementos del plan de monitoreo	39
2.7.3. Indicadores	40
CAPÍTULO III- METODOLOGÍA	42
3.1 Tipo de Investigación.....	42

3.2 Diseño de Investigación	42
3.3 Hipótesis y Variables	42
3.4 Objeto de Investigación.....	44
3.5 Materiales e Instrumentos	44
CAPÍTULO IV- RESULTADOS.....	49
4.1 Diseño de la sincronización de procesos.....	49
4.1.1 Consideraciones para la sincronización de procesos.....	55
4.1.2 Vórtices y agrupación de máquinas	58
4.1.3 Ciclos de operación y distribución de tiempos de proceso.....	60
4.1.4 Proceso de la sincronización global.	64
4.1.4.1 Diseño preliminar el CBOR	65
4.1.4.2 Inserción de las líneas de control	66
4.1.4.3 Inserción de los tiempos de ida y de vuelta en la MMT.....	68
4.1.4.4 Construcción del supermódulo.....	72
4.1.5. Diseño del control de proceso.	80
4.1.6. Ecuaciones de estado de ida.	82
4.2 Automatización.	84
4.3 Simulación del control	105
CAPÍTULO V - CONCLUSIONES	111
Referencias	112

Índice de figuras

Figura 1.1. Revoluciones industriales a lo largo del tiempo	11
Figura 1.2. Componentes del CIM.....	13
Figura 1.3. Ejemplo de un sistema SCADA.....	15
Figura 1.4. Ejemplo de una Red de Petri modelando un sistema discreto para una empresa	16
Figura 1.5. Ejemplo de una máquina de estados en el modelado de una celda de manufactura	17
Figura 1.6. Ejemplo de PLC.....	18
Figura 2.1. Ejemplo de una celda de manufactura	27
Figura 2.2. Tecnología de una celda de manufactura de la empresa FANUC	27
Figura 2.3. Celda de manufactura robotizada: almacén (AS/RS), transportador de dos carriles (CR10) con pistones para cambio de carril (SV15, SV16), robot, mesa de trabajo, sensores para detección de pieza (ZS1, ZS2, ZS3, ZS4) y de recipiente en posición sobre mesa de trabajo.....	28
Figura 2.4. Rueda del CIM de la sociedad de ingenieros de fabricación	32
Figura 2.5. Factoría como sistema	37
Figura 2.6. Secuencia del monitoreo	40
Figura 4.1 Pieza de trabajo y sus operaciones de manufactura	49
Figura 4.2 Distribución de planta y puntos estratégicos	50
Figura 4.3 Distribución de sensores principales y de completud	57
Figura 4.4 Vórtices: 1) Antecesor perfecto, 2) Sucesor perfecto.	59
Figura 4.5 Distribución de tiempos en el módulo 1	63
Figura 4.6 Distribución de tiempos en el módulo 2	63
Figura 4.7 Módulo 1 en FluidSim	106
Figura 4.8 Módulo 2 en FluidSim	106
Figura 4.9 Entradas y salidas del Grafcet.....	107
Figura 4.10 Grafcet del módulo 1	109
Figura 4.11 Grafcet del módulo 2	110

Índice de Tabla

Tabla 3.1 Descripción de Variables de estudio	43
Tabla 4.1 Tiempos Fijos.....	50
Tabla 4.2 Modularización	58
Tabla 4.3 Tablas de sincronización local	64
Tabla 4.4 Tabla preliminar del CBOR	66
Tabla 4.5 Líneas de control del sensado de ida.....	67
Tabla 4.6 Inserción de los tiempos de ida	70
Tabla 4.7 Inserción de los tiempos de vuelta	72
Tabla 4.8 Inserción de las líneas de control del módulo 1 sobre el módulo 2.....	75
Tabla 4.9 Inserción de los tiempos de ida y vuelta del módulo 1 sobre el módulo 2.....	77
Tabla 4.10 CBOR funcional.....	80
Tabla 4.11 Ecuaciones de estado para el control de procesos.....	81
Tabla 4.12 CBOR operacional con ecuaciones de estado y sensado bandera.....	83
Tabla 4.13 Sensado robusto del módulo 1	85
Tabla 4.14 Sensado robusto del módulo 2.	86
Tabla 4.15 CBOR con sensado robusto	87
Tabla 4.16.Tabla de inicio para la automatización.....	87
Tabla 4.17. Tabla final para el inicio de la automatización	87
Tabla 4.18 Estados y transiciones actuador R1	88
Tabla 4.19 Ecuaciones de estado actuador R1	89
Tabla 4.20 Estados y transiciones actuador M1	90
Tabla 4.21 Ecuaciones de estado actuador M1	91
Tabla 4.22 Estados y transiciones actuador R1	91
Tabla 4.23 Ecuaciones de estado actuador R1	93
Tabla 4.24 Estados y transiciones actuador R1.....	93
Tabla 4.25 Ecuaciones de estado actuador R1	95
Tabla 4.26 Estados y transiciones actuador M2	95
Tabla 4.27 Ecuaciones de estado actuador M2	96
Tabla 4.28 Estados y transiciones actuador R1	97
Tabla 4.29 Ecuaciones de estado actuador R1	98
Tabla 4.30 Estados y transiciones actuador R2	98
Tabla 4.31 Ecuaciones de estado actuador R2	99
Tabla 4.32 Estados y transiciones actuador B1	100
Tabla 4.33 Ecuaciones de estado actuador B1	100
Tabla 4.34 Estados y transiciones actuador R3.....	101
Tabla 4.35 Ecuaciones de estado actuador R3	102
Tabla 4.36 Inserción del sensado bandera robusto.....	103
Tabla 4.37 Ecuaciones de estado generales.....	105

CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los antecedentes relacionados con la presente investigación, así como la problemática, los objetivos, la justificación, los alcances y las delimitaciones.

1.1. Antecedentes

Hoy en día la producción busca un aumento constante de la productividad laboral, la rentabilidad y la competitividad de las empresas. Esto requiere la solución de complejas tareas de preparación, planificación, aplicación y racionalización de la mano de obra, el control de la producción y la mejora de todo el proceso de producción. Bajo estos requisitos se imponen grandes exigencias de una tecnología automatizada progresiva, que sea capaz de garantizar el buen funcionamiento de la producción [1].

Los conceptos de automatización y trabajo mecanizado y automatizado existen desde hace décadas. Según la enciclopedia Britannica, la automatización es "la aplicación de máquinas a tareas que antes realizaban los seres humanos o, cada vez más, a tareas que de otro modo serían imposibles". Aunque el término mecanización se utiliza a menudo para referirse a la simple sustitución del trabajo humano por máquinas, la automatización implica generalmente la integración de las máquinas en un sistema autónomo" [2].

La automatización es la clave de la modernización y se ha entendido conceptualmente como una forma de aumentar la eficiencia y mejorar la productividad. El proceso de hacer que la máquina siga una secuencia predeterminada de operación con poco o ningún trabajo humano, utilizando equipos y dispositivos especiales que realizan y controlan los procesos de fabricación se conoce como automatización. Los objetivos de la automatización son la integración de varios aspectos de las operaciones de fabricación para reducir el costo de la mano de obra, mejorar la productividad o la eficiencia, mejorar la calidad, reducir la participación humana, por lo tanto, el error humano, reducir el daño de la pieza de trabajo que la manipulación manual causó, aumentar el nivel de seguridad. Los componentes fundamentales de cualquier proceso automatizado son (1) una fuente de energía, (2) un mecanismo de control de retroalimentación, y (3) un comando programable [3].

De hecho, la automatización industrial y la computación forman parte de la base conceptual de la llamada tercera revolución industrial y de la cuarta revolución. El término “revolución industrial” se refiere a un proceso de transformación económica y social, generalmente detonado por uno o varios avances tecnológicos. Desde la primera revolución industrial donde las máquinas a vapor agilitaron la producción en masa de las industrias, luego con la primera guerra mundial el proceso de industrialización cambió su naturaleza y el crecimiento económico varió de modelo con la utilización de la electricidad, gas y el petróleo, así como de la telefonía y la radio que introdujeron la internacionalización de la economía. Poco más tarde, con el crecimiento de la electrónica y la proliferación de las tecnologías de la información dan lugar a la tercera revolución industrial, siendo las computadoras la base de su acelerado desarrollo. En la actualidad con la abundancia de información, la movilidad y conectividad de las tecnologías de información han inducido cambios en la demanda del mercado, el cual exige modelos de negocios flexibles y relacionados globalmente utilizando la conectividad del Internet. Así como en el siglo XVIII fue la máquina de vapor, en el XXI serán los robots los que marquen la pauta de una transformación radical, que cambiará el mundo tal como lo conocemos, los economistas le han llamado la Cuarta Revolución Industrial (ver Figura 1.1), una corriente de innovación y automatización en la era digital, que ya está en marcha y que ha llegado para quedarse [4].

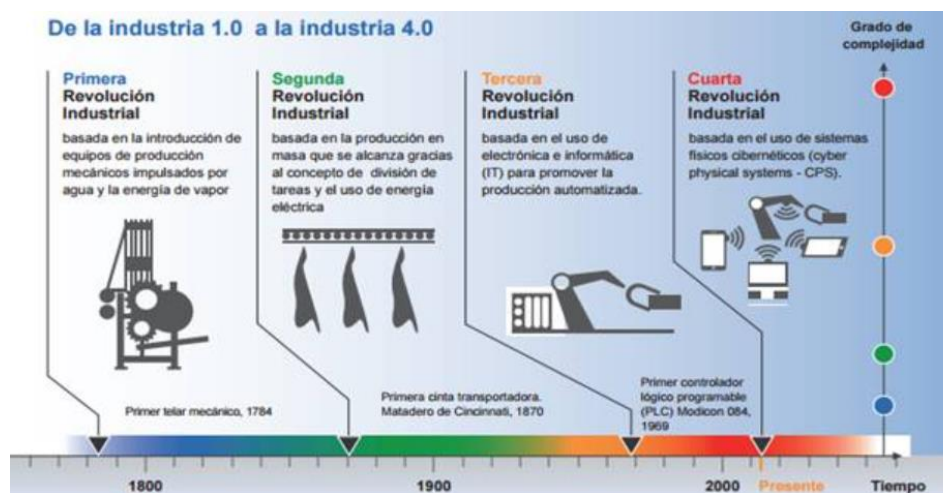


Figura 1.1. Revoluciones industriales a lo largo del tiempo (López, Lovato y Abad, 2018)

La automatización industrial, centro de la manufactura 3.0, llevó a la creación de la filosofía CIM (Computer Integrate Manufacturing) a un estado llamado automatización total, que

consistía en la integración de información geométrica, de manufactura y de procesos (máquinas y control), en conjunto con información de calidad y los materiales, con el propósito de administrar, controlar y monitorear los procesos y operaciones dentro de las líneas de producción.

La Manufactura Integrada por Computadora (CIM, del acrónimo en inglés), es un método de manufactura en el que el proceso de producción completo es controlado por computadoras (control de lazo cerrado basado en lecturas en tiempo real de los sensores). La obtención de un modelo dinámico para el sistema es necesario para iniciar su análisis, detectar comportamientos no deseados o de conflicto y obtener esquemas de control para establecer una dinámica deseada en la ejecución de tareas específicas y flexibles. Comúnmente, el comportamiento de estos sistemas está basado en la ocurrencia de eventos por lo que su estudio se realiza mediante la teoría de sistemas dinámicos de eventos discretos [5].

El CIM como estrategia de producción busca unificar la información de las distintas áreas para la gestión y control de los procesos; así se incorporan todos los pasos de un proceso de manufactura, esta integración permite que todos los procesos individuales se comuniquen entre sí de manera rápida e inicien acciones, con ello la fabricación puede ser rápida y menos propensa a errores o posibles contratiempos, por otro lado, poseen flexibilidad de diseño por lo que pueden ser ajustados de manera adecuada. Dentro del CIM se cubren puntos como diseño, análisis, planeación, costos, logística, almacenamiento, gestión y distribución de productos para proveer un monitoreo y control de todas las operaciones [6]. La Figura 1.2, muestra un esquema general del CIM.

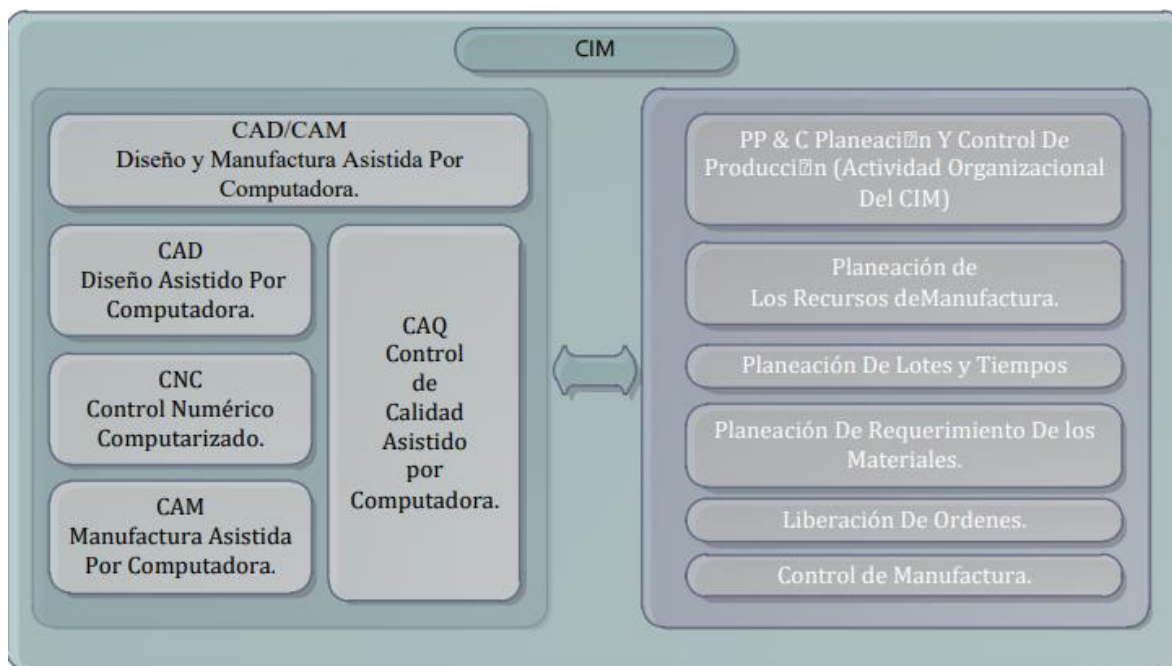


Figura 1.2. Componentes del CIM (Torres, Huerta y Bautista, 2018)

Uno de los elementos del CIM son los sistemas de manufactura flexibles. Estos son sistemas compuestos de máquinas o dispositivos que pueden ser modificados para cambios en los volúmenes de producción o en modificaciones en los procesos. Un Sistema de Manufactura Flexible (SMF) está dinámicamente interactuando con su medio ambiente, lo cual afecta en la operación general. Los cambios se deben: a) al número de productos a fabricar, b) el ciclo de vida del producto y, c) a la gama de productos a manufacturarse dentro del SMF. Esto trae como consecuencia la preparación de los dispositivos de sujeción, la programación de los diferentes elementos automáticos (robots, actuadores, centros de maquinado, sistemas de inspección, etc.) y al registro de información [7].

Los factores que intervienen para que el sistema de manufactura sea flexible son principalmente: la capacidad de disminuir o aumentar la cantidad de la producción, el tipo de manufactura y como esta pueda producir con una misma máquina, las diferentes operaciones que reflejan eficiencia en la elaboración de productos y el cliente a quien está enfocado todo el proceso para poder satisfacer su necesidad. Los beneficios de un FMS son bastante amplios desde el mismo hecho que intensifica el uso de las máquinas de un proceso, así como también reduce la cantidad de las mismas, entonces al disminuir la cantidad de maquinaria se reduce el espacio empleado para el sector de producción, el que puede ser aprovechado dentro de la

empresa para otros enfoques. Se logran menores tiempos de entrega al evitar la existencia de los indeseados tiempos muertos o cuellos de botella [8].

Las celdas de manufactura flexible al ser parte de un concepto de automatización del CIM deben contar con sistemas de control y monitoreo. Se le da el nombre de Supervisory Control And Data Acquisition o Control con Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA) a cualquier software que permita el acceso a datos remotos de un proceso y permita, utilizando las herramientas de comunicación necesarias en cada caso, el control del mismo. Atendiendo a la definición se nota que no se trata de un sistema de control, sino de una utilidad software de monitorización o supervisión, que realiza la tarea de interfase entre los niveles de control y los de gestión a un nivel superior. Los sistemas SCADA se conciben principalmente como una herramienta de supervisión y mando. Entre sus objetivos se pueden destacar los siguientes: Economía, Accesibilidad, Mantenimiento, Ergonomía, Gestión, Flexibilidad y Control [9]. La interconexión de los sistemas SCADA también es propia, y se realiza mediante una interfaz del PC a la planta centralizada, cerrando el lazo sobre el ordenador principal de supervisión. El sistema permite comunicarse con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, sistemas de dosificación, etc.) para controlar el proceso en forma automática desde la pantalla del ordenador, que es configurada por el usuario y puede ser modificada con facilidad. Además, provee a diversos usuarios de toda la información que se genera en el proceso productivo. La Figura 1.3, muestra un ejemplo de un sistema SCADA [10].

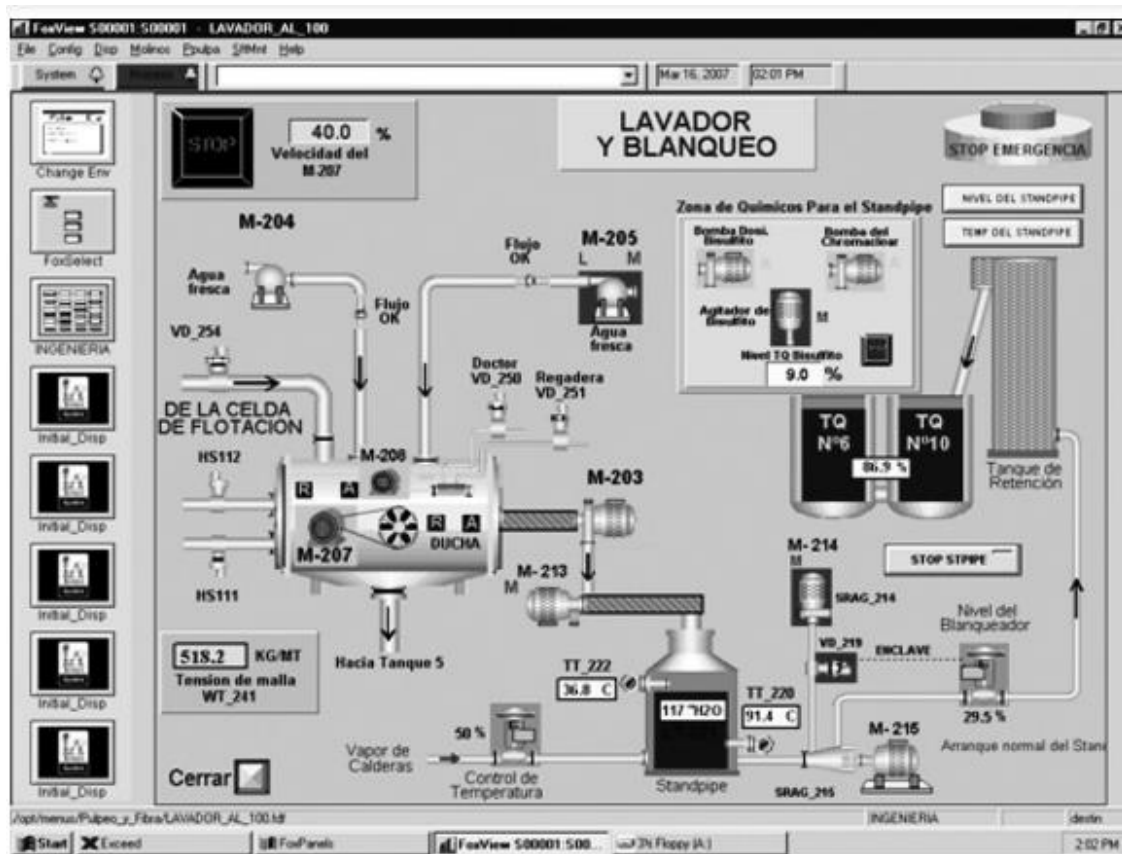


Figura 1.3. Ejemplo de un sistema SCADA (Pérez 2015)

Por otro lado, una de las herramientas esenciales de la automatización es la simulación computacional. Esta es una técnica que imita el comportamiento de un sistema. En general una simulación requiere de modelos lógicos y matemáticos para poder representar y hacer posible las entradas y salidas de un simulador. Los sistemas de modelado discreto se usan para tal propósito. La simulación por eventos discretos (Discrete Event Simulation, DES) es aplicada en el estudio de sistemas que pueden ser representados mediante modelos lógico-matemáticos discretos. En los mismos las variables de interés cambian de manera instantánea, sólo en un determinado número contable de instantes precisos, dado un intervalo determinado de tiempo [11].

Las Redes de Petri se constituyen en una herramienta fundamental para el modelado de sistemas dinámicos de eventos discretos [12]. Las Redes de Petri clásicas se conciben como un grafo dirigido que posee dos tipos de nodos principales: los lugares representados por círculos y las transiciones representadas por barras rectangulares (ver Figura 4). Entre los

Los nodos se ubican los arcos dirigidos, los cuales se encargan de unir las transiciones con los lugares y viceversa. Cada arco dirigido posee un número que indica su peso, el cual determina la cantidad de marcas que consume de un lugar o deposita en un lugar, siempre y cuando se haya disparado una transición habilitada. Los arcos dirigidos sin número se interpretan como que consumen o depositan una marca. Las marcas se representan en forma gráfica como puntos negros que se ubican dentro de cada lugar [13]. Las redes de Petri se aplican en diversos procesos. Por ejemplo, en la Figura 1.4, se muestra una red de Petri que modela una planta de chocolates [14].

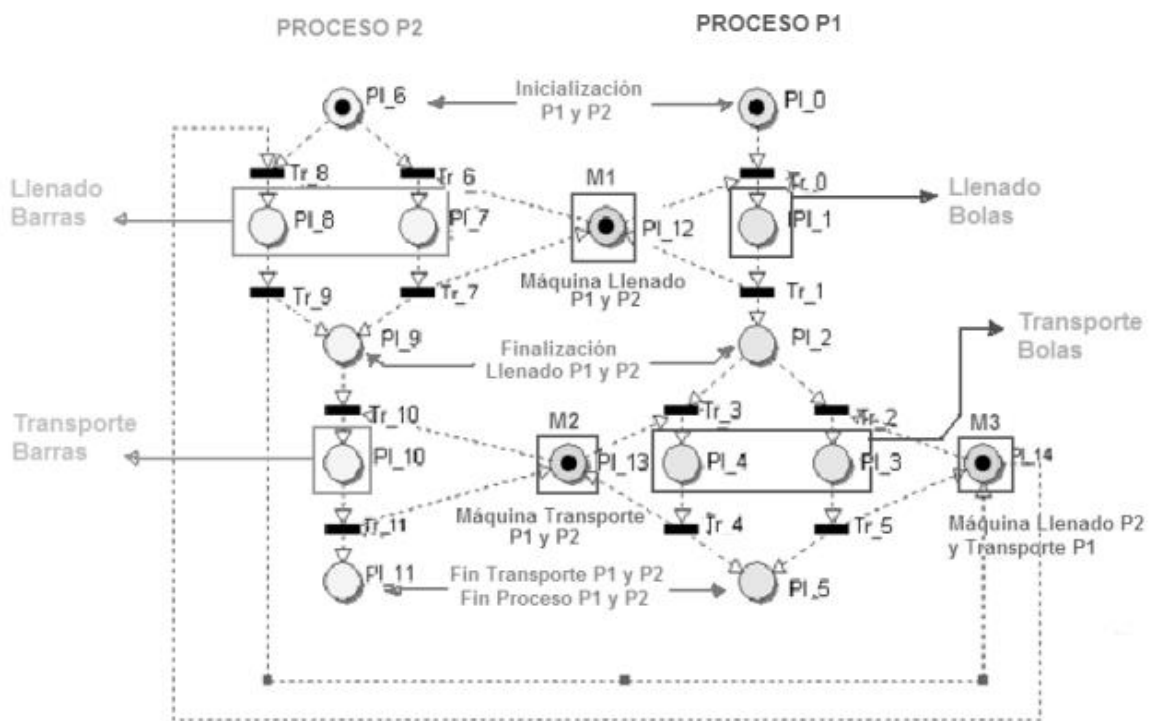


Figura 1.4. Ejemplo de una Red de Petri modelando un sistema discreto para una empresa (Castellanos y Solaque 2010)

Del mismo modo, el análisis y diseño de un sistema de eventos discretos puede realizarse en forma estructurada utilizando máquinas de estado. La máquina de estados describe paso a paso, la secuencia o el proceso a implementar, incluyendo las acciones a realizar, así como las condiciones que permiten determinar que el paso ha terminado y se puede proseguir con el siguiente (transiciones entre etapas o estados). Puede utilizarse una representación gráfica o tabular de la máquina de estados. A partir de dicha representación se deriva directamente la implementación del sistema: ecuaciones lógicas para programación de estados y de salidas

en función de los estados activos. De esta manera, la máquina de estados asiste tanto el diseño como la programación del sistema de control secuencial [15]. El uso de máquinas de estados provee una herramienta de análisis del problema y de síntesis de la lógica de control para su solución, y conduce a una programación directa y estructurada al mismo tiempo. El concepto de control supervisorio, tradicionalmente se ha asociado al control de eventos discretos mediante máquinas de estados bajo la intención de dar una robustez a los sistemas de control para mantener un comportamiento o desempeño aceptable [16]. La Figura 1.5, muestra el modelado con máquinas de estado de una línea de producción.

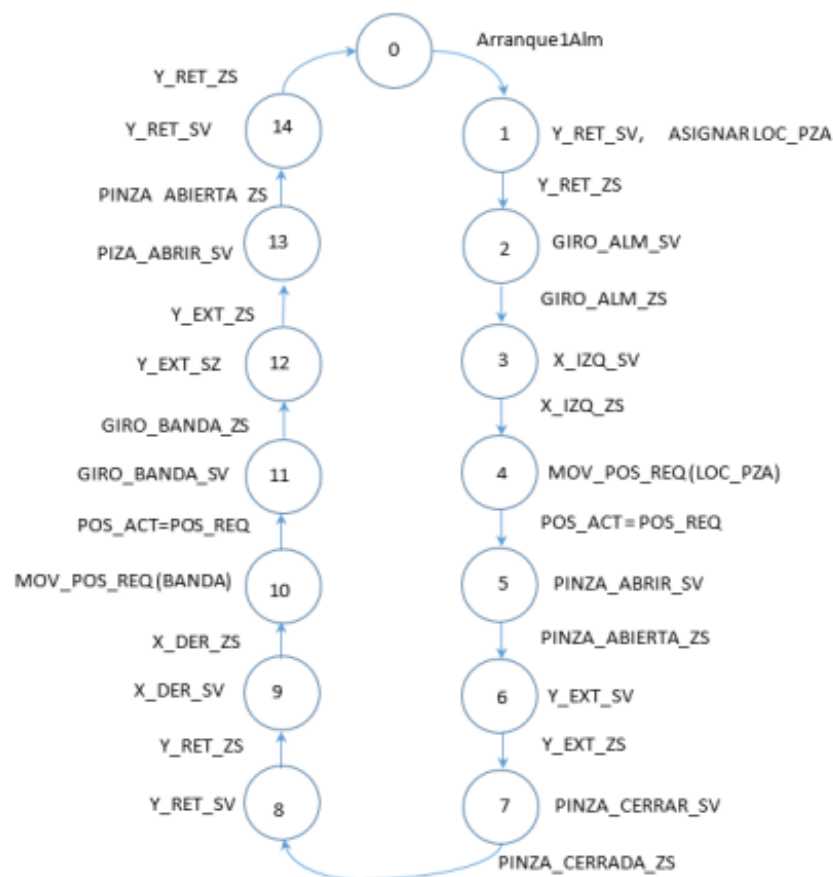


Figura 1.5. Ejemplo de una máquina de estados en el modelado de una celda de manufactura (Sánchez y Martell, 2019)

Por otro lado, uno de las tecnologías que permitió la implementación de la automatización industrial a gran escala es el PLC (Programmable Logic Controller).

Debido a las demanda de la industria de un sistema económico, robusto y flexible, hizo que se desarrollasen los autómatas programables industriales (PLC), los primeros autómatas pretendían sustituir a los sistemas convencionales con relés o circuitos lógicos, con la ventaja evidente que suponía tener un hardware estándar, los autómatas actuales han mejorado sus prestaciones respecto a los primeros en muchos aspectos, pero fundamentalmente a base de incorporar un juego de instrucciones más potentes, mejorar la velocidad de respuesta y dotar al autómata de capacidad de comunicación. Todo ello ha potenciado su aplicación masiva al control industrial [17].

De acuerdo con la definición de la National Electrical Manufacturers Association (NEMA), un controlador lógico programable (PLC) (ver Figura 1.6), es “un dispositivo electrónico operado digitalmente, que usa una memoria programable para el almacenamiento interno de instrucciones con el fin de implementar funciones específicas, tales como lógica, secuenciación, registro y control de tiempos, conteo y operaciones aritméticas para controlar, a través de módulos de entrada/salida digitales o analógicos, varios tipos de máquinas o procesos” [18]. Originalmente fue desarrollado como un dispositivo de control secuencial para reemplazar los circuitos electromecánicos basados en relés y desde entonces es usado ampliamente en la automatización de procesos industriales [19].



Figura 1.6. Ejemplo de PLC (Tomado de: <https://www.automation24.biz/simatic-s7-1200>)

Por otro lado, la automatización debe ser capaz de sincronizar las líneas de producción para que se puedan obtener los volúmenes de producción requeridos. La Manufactura Sincronizada es una forma sistemática que pretende mover los materiales rápida y suavemente por los diversos recursos de una planta en concierto con la demanda del mercado

[20]. La Manufactura Sincrónica se refiere a todo el proceso de producción trabajando junto, en armonía, para alcanzar los objetivos de la empresa; el énfasis está en el desempeño total del sistema [21]. El término "sincronización" en la fabricación se refiere a la provisión de los componentes correctos a las etapas de producción subsiguientes en el momento adecuado en el tiempo. Se supone ampliamente que la sincronización es beneficiosa para el rendimiento logístico de los sistemas de fabricación [22]. Este mismo concepto puede ser adaptado a procesos de sincronización similares, por ejemplo, a los sistemas de producción que deben cumplir los volúmenes de producción en tiempo y forma.

La sincronización de procesos se define como sigue: es el conjunto de procedimientos sistemáticos orientados a coordinar, planear, manejar, distribuir y controlar las operaciones de la maquinaria de un sistema productivo de tal forma que los volúmenes de producción sean satisfechos en el tiempo acordado [23]. La sincronización debe: 1) ser planeada y diseñada y 2) debe ser probada e implementada. La sincronización de procesos se clasifica en: 1) sincronización local y 2) sincronización global. Es local, cuando la sincronización se realiza en módulos de producción. Es global cuando la sincronización considera todos los módulos en su diseño y análisis [24]. Un sistema productivo se dice sincronizado si la diferencia temporal entre la primera pieza fabricada y la segunda es el Tiempo de Producción Unitario.

Toda manufactura sincronizada debe tener asociado un sistema tecnológico que permita operar la maquinaria de manera tal que se cumplan los volúmenes de producción. Esto es, la sincronización en una empresa debe estar darse en y entre los sistemas que la conforman. Entre dichos sistemas están las líneas de producción. Una línea de producción está compuesta de maquinaria, de flujos de materiales o materias primas, recursos humanos, etc., todos estos elementos deben coordinarse, planearse, manejarse y controlarse de manera tal que la producción este sincronizada, esto es, que los volúmenes de producción sean cumplidos, o que la producción unitaria sea satisfecha [25].

1.2. Planteamiento del problema

Si bien la automatización industrial es el centro de la tercera revolución industrial, esta seguirá formando parte de la industria 4.0, por lo que su vigencia como tecnología seguirá mucho tiempo más. Como la base de una revolución industrial, los métodos de la

automatización industrial no se han agotado, por lo que es importante y necesario desarrollar nuevas técnicas o mejorar las metodologías que ya existen. En este sentido, muchos métodos y procedimientos se han desarrollado para automatizar líneas de producción.

La potencia de una metodología se basa en su robustez, entendida como la integración de diversos métodos y técnicas que hacen posible mejorar y extender los alcances de una determinada metodología en términos de las aplicaciones y la generación de nuevos modelos. Bajo estos antecedentes se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles serían los beneficios que se lograrían si se potenciará la metodología de sincronización propuesta por el Doctor Jiménez al introducir modelos de sistemas discretos a sus fases de aplicación?

1.3. Justificación

La metodología propuesta ayudaría en gran medida a las empresas que requieran diseñar la automatización de sus líneas de producción y a reconfigurar los sistemas de manufactura ante cambios en el diseño de partes y el volumen de producción. La metodología busca reducir los tiempos del diseño y de la implementación de la automatización al integrar los tiempos de procesos y los sistemas discretos, por lo que propuesta es en este sentido robusta. Del mismo modo, una simulación del proceso será de gran ayuda para las empresas debido a que será posible tener una herramienta que permita visualizar las secuencias de movimiento de cada máquina y los eventos de señalización.

Por otro lado, la metodología propuesta y el diseño de la simulación podrán ser utilizados para la enseñanza de diversas materias en las carreras de Mecatrónica, Ingeniería Industrial e Ingeniería Mecánica, pues ambas propuestas pueden implementarse en los sistemas de manufacturas didácticos con los que cuentan las universidades. La introducción de los modelos discretos a la metodología permitirá que los alumnos puedan usar matemáticas y software en el diseño de la automatización.

1.4. Objetivos

Los objetivos generales y específicos que se pretenden alcanzar con esta tesis son los siguientes:

1.4.1. Objetivo general

Mejorar una metodología para el control y la sincronización de procesos industriales, utilizando sistemas discretos y los métodos de sincronización local y global, para potenciar la automatización industrial.

1.4.2. Objetivos específicos

- 1) Estudiar los métodos de la sincronización local y global para conocer las relaciones entre los tiempos globales y de proceso.
- 2) Proponer el diseño de una metodología que relacione la sincronización con los métodos de automatización de sistemas productivos
- 3) Analizar dos métodos de sistemas discretos para el modelado de la automatización

1.6. Alcances y delimitaciones

1.6.1. Alcances

- 1) La metodología se probará solo en simulación.
- 2) La simulación será diseñada para un caso en particular integrado por dos módulos de producción

1.6.2. Delimitaciones

La presente investigación estará restringida de la manera siguiente:

- 1) La metodología solo considera líneas de producción secuenciales.
- 2) Se aplicarán las restricciones de los modelos de sincronización propuestos por Jiménez et al, (2003).
- 3) El modelo será exclusivo de la simulación
- 4) Para la realización de este proyecto la metodología se aplicará a una celda en específica.

CAPITULO II - MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen todos los temas relevantes con respecto al proyecto realizado. Se tratan los temas de tantos aspectos generales de la automatización de procesos y características de este, así como también los tipos de sistema de este. Después se cambia de enfoque para explorar los conceptos celdas de manufactura, el concepto del CIM y manufactura síncrona. Por último, se abordan los diferentes modelos de sincronización y sistema discretos, y se trata a detalle el concepto de elementos de monitoreo.

2.1. Aspectos generales de la Automatización de Procesos

Para hablar de automatización de procesos, necesitamos saber qué es la automatización en general. La automatización se entiende como una tecnología que utiliza varios sistemas mecánicos, electrónicos e informáticos para controlar y gestionar mejor la producción de consumibles físicos, sin mencionar el hecho de que incluye muchos sistemas y procesos realizados con una intervención humana mínima o nula. [26].

2.1.1. Automatización industrial

La automatización industrial se refiere al uso de sistemas de control, ya sean computadoras o robótica, y tecnología de la información, es decir, el control de procesos y máquinas en la industria para reducir o reemplazar el movimiento humano. En otras palabras, las computadoras y las máquinas reemplazarán la toma de decisiones humana en el proceso de producción. La finalidad de estos sistemas de control es tratar de minimizar la intervención humana en los procesos productivos con el fin de reducir la posibilidad de error humano y así conseguir una mayor productividad frente al control manual de trabajo de este proceso.

Para poder automatizar algún proceso es necesaria la implementación de un sistema de control, en los cuales se encuentran los controladores lógicos programables (PLC), computadoras personales (PC), controladores de automatización programables (PAC), entre otros, y algún protocolo de comunicación con el cual el controlador interactúa con los sensores y actuadores del proceso [27].

- **Ventajas y beneficios**

Son tan importantes las ventajas que se obtienen de la automatización en el área de la industria que toda la perspectiva actual apunta hacia las nuevas tendencias en automatización de procesos, una de las ventajas que más destacan es el costo óptimo de operación, lo que hace una menor inversión en personal debido a la reducción en el esfuerzo que conllevan los procesos automatizados, el incremento en la productividad y la calidad de los productos, esto siendo consecuencia de la reducción de la participación humana y la posibilidad de errores con ella, sin mencionar que al ser operadas en parte por máquinas autómatas, las plantas pueden trabajar las 24 horas al día. Una de las ventajas más importantes en el caso de este proyecto es el aumento en la seguridad para los operadores del sistema automatizado, ya que el control automático responde a una cantidad de sensores que permiten conocer el estado del sistema en todo momento, reduciendo las situaciones de riesgo potencial. Para esto, además, se implementan medidas de seguridad desde la programación del controlador.

2.1.2. Jerarquía de un sistema de automatización

En esencia, los sistemas de automatización industrial se caracterizan por un alto grado de complejidad, teniendo una gran cantidad de dispositivos sincronizados en combinación con tecnologías de automatización. Los niveles que dividen las diferentes jerarquías son los siguientes:

El primer nivel se denomina nivel de campo y es el nivel más bajo. Como sugiere el nombre, contiene dispositivos de campo como sensores y actuadores. La tarea principal de estos dispositivos de campo es llevar los datos de la máquina y el proceso al siguiente nivel para su monitoreo y análisis. Incluye control de parámetros a través de un conjunto de actuadores.

El sensor es un dispositivo que detecta y recibe parámetros en tiempo real a medida que cambia el entorno, como temperatura, presión, flujo, nivel, etc. y convertirlos en señales eléctricas. Estos datos se envían al controlador para el monitoreo y análisis de parámetros.

Otros dispositivos a este nivel son los actuadores que convierten las señales eléctricas del controlador en un control de proceso mecánico. Ejemplos de actuadores son las válvulas de control de flujo, las válvulas de solenoide, los actuadores neumáticos, los relés, los motores de corriente directa (CC) y los servomotores.

El siguiente nivel se llama el nivel de gestión. Este nivel incluye varios dispositivos de automatización como máquinas de control numérico por computadora (CNC), PLC y otros que reciben parámetros de proceso de varios sensores. El controlador controla automáticamente el actuador en función de la señal procesada del sensor y la técnica de programación o control.

Los controladores lógicos programables son capaces de proporcionar funciones de control automático basadas en datos de sensores. Estos incluyen varios módulos como la unidad central de procesamiento (CPU), entrada y salida analógica, entrada y salida digital y módulo de comunicación. Esto permite al operador programar una función o estrategia de control para realizar ciertas operaciones automatizadas durante el proceso.

El nivel superior es el nivel que supervisa y controla la producción. Aquí, los dispositivos automatizados y los sistemas de monitoreo, como las interfaces hombre-máquina, brindan funciones de control e intervención. Estas funciones incluyen, entre otras, la supervisión de varios parámetros, el establecimiento de objetivos de producción, el almacenamiento del historial, el arranque y la parada de máquinas.

Y por último el nivel de información o de negocio. Este es el nivel más alto de automatización industrial que controla todo el sistema de automatización. Las actividades en este nivel incluyen, entre otras, la planificación de la producción, el análisis de clientes y mercados, y la compra y venta. Como tal, se ocupa más de las actividades comerciales y menos de los aspectos técnicos. Otro elemento importante de los sistemas de automatización industrial son las redes de comunicación industrial, que se encargan de transmitir información entre diferentes niveles. Estas redes están presentes en todos los niveles del sistema de automatización para garantizar un flujo continuo de información. Sin embargo, las redes de comunicación pueden diferir en diferentes niveles.

De todas las jerarquías anteriores, podemos concluir que existe un flujo continuo de información de un nivel a otro. Si lo representamos gráficamente podemos decir que es una pirámide donde la información se agrupa a medida que subimos y obtenemos información detallada del proceso a medida que bajamos.

2.1.3. Tipos de sistemas de automatización de procesos industriales

Según el tipo de proceso que se quiera controlar y teniendo en cuenta posibles cambios futuros, la automatización se puede dividir en diferentes tipos, es decir, según la solución requerida, los controles del sistema se diseñan según uno de los métodos de automatización.

1) Automatización fija

Este tipo de automatización se utiliza a menudo, como su nombre indica, para realizar operaciones continuas y repetitivas para lograr una alta eficiencia. Utilice equipos especializados o dedicados para automatizar las operaciones de mecanizado o ensamblaje en una secuencia predeterminada. Una vez definido, un producto es relativamente difícil de cambiar o rediseñar. Por lo tanto, no es flexible ofrecer una amplia gama de productos, pero mejora la eficiencia a través de una mayor productividad y costos unitarios reducidos. Por ejemplo, los sistemas de automatización estacionarios se usan comúnmente en destilerías, talleres de pintura, transportadores, etc.

2) Automatización programable

Durante esta automatización, es posible cambiar un tipo de producto en particular, así como la operación de ensamblaje o mecanizado, cambiando el programa de control en el equipo automático. Esta automatización se adapta mejor a la producción en masa de volumen medio a alto. Pero al mismo tiempo, es difícil cambiar y reconfigurar el sistema para un nuevo producto o secuencia de operaciones. Por lo tanto, cambiar la secuencia operativa o introducir un nuevo producto requiere un tiempo de configuración considerable. Ejemplos de este tipo de automatización son: máquinas y herramientas CNC, papeleras, acerías, robots industriales y otros.

3) Automatización flexible

Este sistema de automatización proporciona equipos de prueba automatizados para una mayor flexibilidad en los cambios de diseño de productos. Estos cambios se pueden realizar rápidamente mediante comandos dados en forma de código por el operador. Este tipo de automatización permite a los fabricantes producir múltiples productos en un proceso conectado en lugar de procesos separados. Algunos ejemplos de este sistema de

automatización son: coches autónomos, coches y máquinas multifunción CNC (Control Numérico Computarizado) [28].

2.2 Celdas de manufactura

2.2.1 Definición

Una celda de producción es un dispositivo que simula una línea de producción automatizada, compuesta por varias estaciones de trabajo (almacenamiento, transporte, procesamiento, montaje y control), que se integran e interactúan entre sí.

Otra definición del espacio de trabajo es que es una tecnología diseñada para optimizar el rendimiento de un área de trabajo con el fin de eliminar de manera constante y gradual cualquier actividad sin valor agregado del proceso. . El resultado final es una reducción de los tiempos de ciclo, lo que en última instancia conduce a una reducción de los inventarios de materias primas, productos en curso y productos terminados, así como a una reducción significativa de los productos defectuosos. Hoy en día, existen celdas de producción configuradas a través de Ethernet que se pueden controlar desde una computadora. También existen diferentes paquetes de software que se enfocan en trabajar con robots, como Step7 o LabView.

2.2.2. Ejemplos de celdas de manufactura

En la Figura 2.1 se puede ver un ejemplo de una parcela de productor. Esta celda está conectada vía ethernet y tiene una computadora central que controla cada comando. Uno de los elementos de este sistema es el Personal Handheld Telephone System (PHS), que es un sistema de telefonía digital inalámbrica que brinda servicios de voz y datos de alta calidad y alta capacidad. Transfiere datos de cada componente a la LAN a través de PHS y controle la LAN a través de Ethernet. La señal PHS se envía a la computadora central, donde se controla cada elemento de la red.

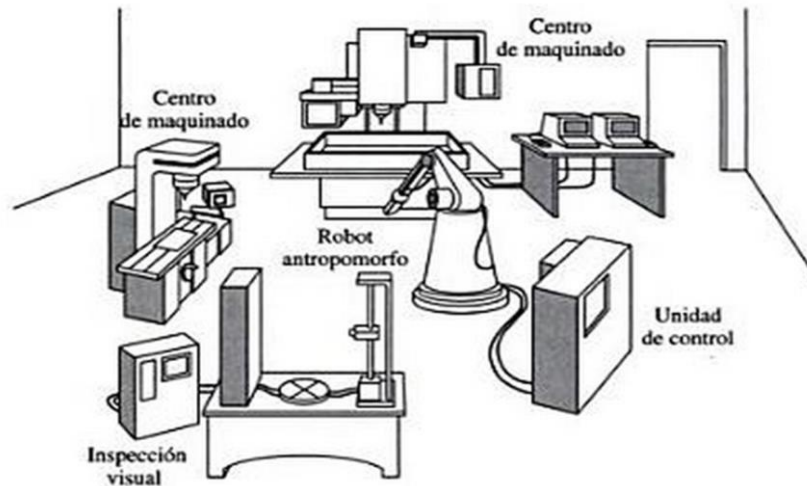


Figura 2.1. Ejemplo de una celda de manufactura (Necoechea, A, 2018)

En la Figura 2.2, tenemos otro ejemplo de una celda que tiene una función de comunicación común en un controlador de robot R-J3i8 y puede crear una red de muchos robots con una computadora central, PLC y otros robots periféricos para controlar y administrar la producción. El procesador de comunicación dedicado garantiza alta velocidad y estabilidad de la comunicación sin afectar negativamente el movimiento del robot. La transferencia de archivos de E/S de archivos entre el robot y el PLC y la comunicación de E/S en serie entre el robot y los periféricos proporcionan una poderosa solución de red industrial. Además, hay un controlador de alta velocidad y un PMC (controlador de máquina programable) integrados en el controlador del robot.

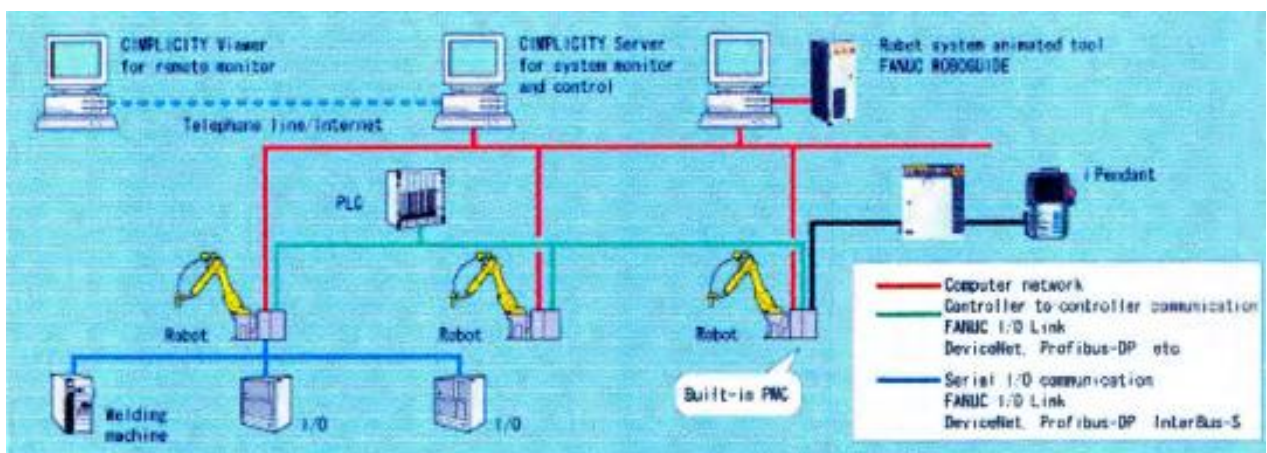


Figura 2.2. Tecnología de una celda de manufactura de la empresa FANUC (Necoechea, A, 2018)

En este cuadro, se utiliza un paquete llamado CIMPLICITY para monitorear y administrar el sistema de producción. CIMPLICITY, integrado con la computadora, brinda un control avanzado del sistema robótico incluso en una ubicación remota a través de una línea telefónica para satisfacer las necesidades del área de producción mediante el monitoreo y control de robots, PLC y periféricos conectados a través de Ethernet.

En este ejemplo, hay otro dispositivo, "iPendant", que nos permite realizar operaciones de entrenamiento en el robot. iPendant se puede conectar a la red de la planta e Internet, lo que le permite ver diferentes tipos de información en el campo. También permite a los usuarios crear y agregar sus propias pantallas [29].

La siguiente celda de producción incluye un almacén que se usa para almacenar piezas de trabajo y piezas de trabajo, un robot cartesiano que le permite llegar a diferentes ubicaciones en el almacén, un sistema de transporte que le permite mover las piezas a su ubicación. El robot regresa al almacén y el brazo robótico articulado realiza el procesamiento (Figura 2.3).

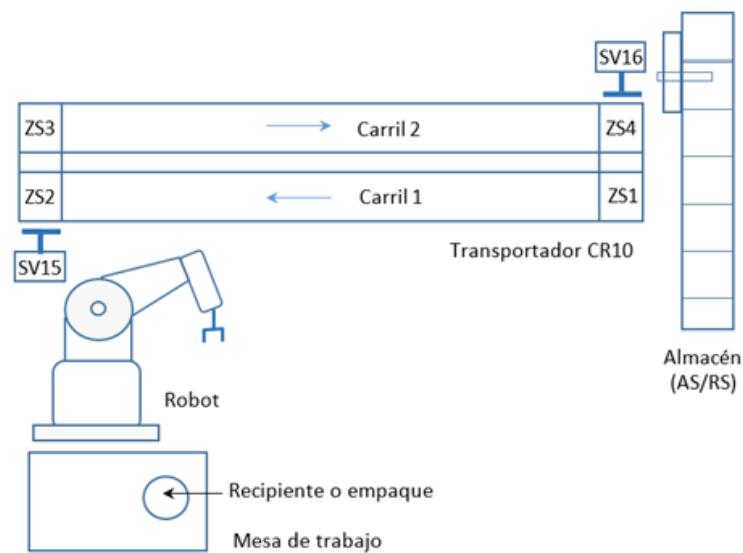


Figura 2.3. Celda de manufactura robotizada: almacén (AS/RS), transportador de dos carriles (CR10) con pistones para cambio de carril (SV15, SV16), robot, mesa de trabajo, sensores para detección de pieza (ZS1, ZS2, ZS3, ZS4) y de recipiente en posición sobre mesa de trabajo (Sanchez y Matell 2019)

Un almacén es una estructura que consta de dos columnas con diferentes niveles en las que las mercancías se pueden apilar en un palé, lo que permite sujetarlas para facilitar su movimiento. El subsistema de almacén también incluye un robot cartesiano que puede

moverse horizontalmente de columna a columna, verticalmente a diferentes niveles, insertando y sacando una pieza de su lugar, y finalmente rotando 180 grados entre el almacén y el transportador. El robot cartesiano solo interactúa con la cinta en una ubicación (carril 1 al nivel de la cinta) tanto para colocar artículos como para recogerlos. La mercancía en la cinta transportadora y en el almacén siempre está fijada sobre el palet. Los accionamientos lineales, como los accionamientos giratorios de un robot Descartes, están equipados con sensores de final de carrera y están conectados a un PLC.

El transportador tiene una configuración de anillo. Los dos segmentos están etiquetados como camino 1, que transporta la pieza desde el almacén hasta el robot en el lado opuesto, y camino 2, que transporta la pieza de vuelta al almacén. Dos cilindros lineales de simple efecto mueven la unidad del riel 1 al riel 2 en el lado de la junta del robot y del riel 2 al riel 1 en el lado del cargador. Los sensores de posición de piezas están instalados en ambos extremos de ambos rieles. Hay un PLC para operar las tiras.

El brazo robótico es responsable de procesar piezas que incluyen 6 articulaciones. El robot articulador tiene su propio sistema de control (para controlar el movimiento y la posición de las 6 articulaciones) y está programado en un lenguaje especial de alto nivel. Además de este subsistema, también hay un banco de trabajo con dos sensores de posición. Las entradas y salidas digitales del robot y el sensor de posición de la mesa están conectados al panel de control del PLC.

Las celdas deben automatizarse de acuerdo con las siguientes especificaciones de la función: Robot Carters superan el juego en el lado izquierdo de la revista a la altura definida y lo coloca en la barra 1; El grupo mueve el juego antes del robot y se detiene; El robot toma una pieza (coloca la paleta en el cinturón), realiza la actividad de empaque y devuelve un parcialmente procesado o empaquetado en el cinturón (en la paleta); El trabajo se expande en el rango 2, el cinturón lo mueve hacia el almacén y se detiene, y el cilindro empuja de una pieza a 1; El robot de Carouth juega en un grupo, lo coloca en la columna derecha de la estructura en el nivel determinado de nivel y regresa a la posición inicial: línea 1, el nivel de la correa y opuesto al cinturón. Además de la cirugía automática descrita por las células, debe considerar la cirugía en la mitad del modo automático, en el que puede realizar una cadena

de cada elemento o elemento celular y modo manual para cada unidad funciona individualmente [30].

2.2.3. Flexibilidad de las celdas de manufactura

La globalización de los mercados y las necesidades, deseos y requerimientos en constante cambio de los clientes tienen consecuencias que afectan a las industrias manufactureras que se ven obligadas a buscar nuevas opciones que les permitan seguir siendo competitivas en el entorno del mercado y adaptarse a estos cambios de forma rápida y sencilla. . La flexibilidad se convierte en una característica que permite que los sistemas de fabricación respondan rápida y eficientemente a estos cambios, asegurando calidad y eficiencia [31].

Se ha investigado mucho en torno al concepto de flexibilidad y todo el mundo está de acuerdo en que es un concepto multidimensional, muy subjetivo, incluso inexacto en muchos casos, por lo que es difícil de implementar [32]. La mayor parte de la investigación relacionada con este concepto se ha centrado en analizar los tipos de flexibilidad existentes, y solo un número muy reducido de estudios se ha dedicado a determinar qué tan flexible es un sistema o cómo se puede medir o definir la organización.

La falta de una herramienta que defina claramente las características de la flexibilidad en un sistema u organización y sirva para evaluarla o cuantificarla, hace que este estudio proponga el desarrollo y formulación de un método de medición. Flexibilidad de tal manera que no solo sirva como ayuda para realizar la evaluación sino también como herramienta de diagnóstico en los sistemas a los que se aplicará.

En el contexto de los sistemas de producción, la flexibilidad se puede definir como la capacidad de un sistema para contener o adaptar sus recursos a los cambios que ocurren en él, a menudo bajo la influencia de factores tanto internos como externos, tales como: productos, procesos, requisitos, cargas , máquinas, empleados, etc. [33].

Un tipo o dimensión de flexibilidad consiste de un nombre y de una definición verbal del mismo. En la investigación desarrollada los tipos de flexibilidad considerados fueron los siguientes:

- 1) Flexibilidad en las máquinas
- 2) Flexibilidad en las herramientas
- 3) Flexibilidad en el sistema de manejo de materiales
- 4) Flexibilidad en el sistema de almacenamiento
- 5) Flexibilidad en las comunicaciones
- 6) Flexibilidad en las rutas

Una vez construida la taxonomía de la flexibilidad se diseñó la herramienta de evaluación. A continuación, se señalan las características y ventajas de la misma.

2.3. El concepto del CIM

CIM (Computer Integrated Manufacturing) es un término muy amplio ya que integra una gran cantidad de tecnologías informáticas. Además, su implementación permite resolver problemas muy complejos de gestión del entorno empresarial y productivo.

Actualmente nos encontramos en una fase en la que las tecnologías heredadas de la industria química y el campo de la ingeniería eléctrica convergen en algún momento; fusionar las aportaciones de ambos, utilizando la experiencia de cada uno. Las computadoras modernas tienen microprocesadores muy rápidos y capacidades gráficas avanzadas que permiten integrar funciones de monitoreo y control en la misma máquina. Esto, combinado con el potencial de los controladores actuales y la velocidad y seguridad de las redes de datos con nuevas tecnologías, como los cables de fibra óptica, permite una configuración, funcionamiento y mantenimiento eficientes y sencillos.

Se utilizará la abreviatura CIM para denotar la integración de información relacionada con la administración, diseño, producción y gestión de negocios, incluyendo todas las funciones corporativas desde el análisis de mercado hasta el análisis de distribución de productos.

El significado amplio de CIM incluye objetivos a largo plazo. En muchas empresas, CIM inicialmente se enfoca en la integración de la fabricación como una prioridad principal. Como tal, otras funciones están relacionadas con la producción; puede ser considerado como el elemento central de CIM. Tres factores principales a considerar:

- 1) Procesos de planta

- 2) La planificación de la ingeniería de fabricación de esos procesos.
- 3) La planificación de la producción y control tanto de los procesos de planta como de los materiales utilizados.

Algunos autores han intentado capturar la naturaleza más amplia de CIM llamándolo CIE Computer Integrated Enterprise. Otros usan el término CIME (Computer Integrated Manufacturing Enterprise). El término CIME (ingeniería y fabricación integradas por computadora) también se usa a veces. Como de costumbre, solo se establece el término CIM; pero el concepto del término es tan amplio que puede significar cosas completamente diferentes para diferentes grupos de trabajo.

Uno de los modelos que recoge el concepto de la integración total de todas las funciones de la empresa es la rueda del CIM de la sociedad de ingenieros de fabricación (ver Figura 2.4).

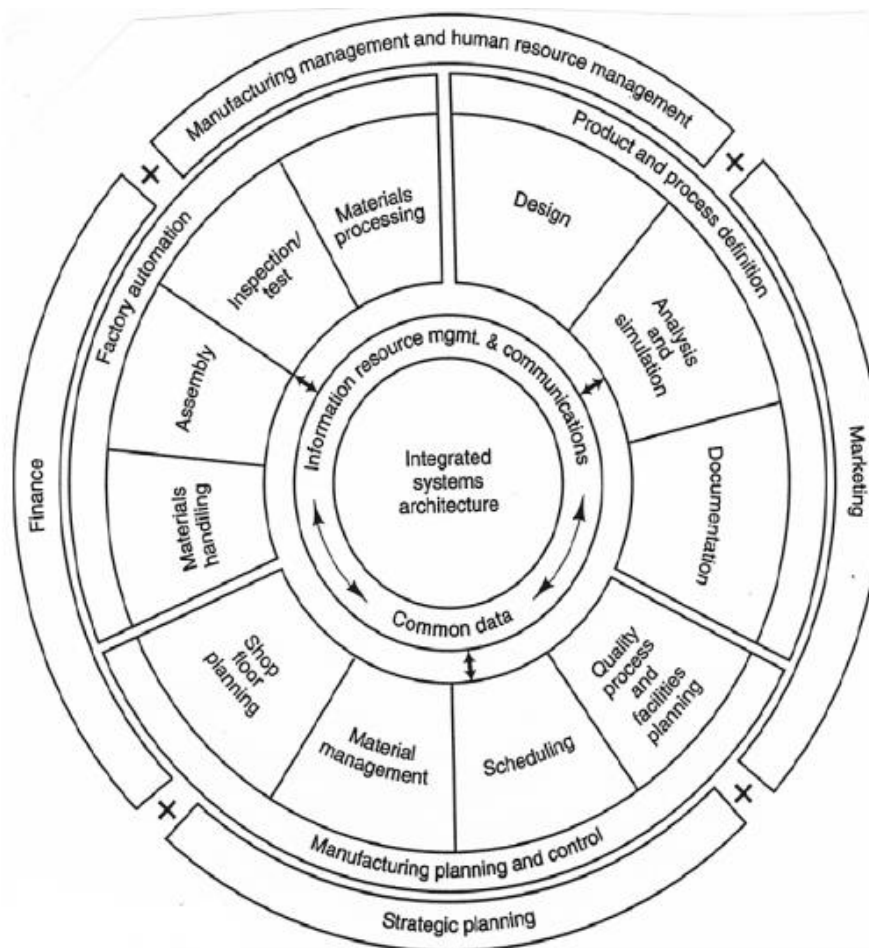


Figura 2.4. Rueda del CIM de la sociedad de ingenieros de fabricación (García y Castillo. 2007)

Tiene varias ventajas, es decir, enumera 21 aspectos operativos de una empresa, agrupándolos en función de la arquitectura de los sistemas de gestión e integración de recursos de información. Otra ventaja es que enfatiza la integridad de la integración y la necesidad de una arquitectura de aprovisionamiento integrada y estratégica con respecto a la organización y gestión de la información y los datos corporativos.

Al mismo tiempo, tiene una serie de deficiencias, una de las cuales es que la función de calidad ahora ha pasado de ser una función separada a un vínculo que conecta todos los componentes de la organización. Esto se considera el nacimiento de Total Quality Management (TQM), por lo que el círculo CIM ahora debe estar rodeado por el círculo de calidad. Continuando con la discusión de las desventajas, la rueda CIM no considera las relaciones externas de la empresa con los proveedores y clientes. Esto actualmente implica algunas limitaciones, porque estas relaciones son extremadamente cercanas [35].

CIM incluye todas las actividades realizadas para crear un producto, desde la identificación, el concepto, el diseño y el desarrollo de las necesidades del producto, hasta la fabricación, la comercialización y el soporte del producto en uso. Además, se relaciona con la automatización, es decir, el uso de métodos y equipos para el control y automatización óptimos del proceso productivo.

Antes de que naciera el término CIM, en las fábricas se utilizaban otros métodos como el control numérico (NC), el control numérico por computadora (CNC), el control numérico distribuido (DNC), la planificación de requisitos, etc., materiales (MRP), la planificación de recursos de fabricación (MRP II), diseño asistido por computadora. (CAD), fabricación asistida por computadora (CAM), diseño y fabricación asistidos por computadora (CAD/CAM), diseño asistido por computadora (CAE) y más [36].

2.4 Manufactura Sincronizada

La manufactura sincrónica es la aplicación de la teoría de las restricciones a la producción, una conclusión directa de cinco pasos. Los principios de producción sincronizada son los principios fundamentales en los que debe basarse la gestión de operaciones en las empresas de fabricación para maximizar la productividad de la organización.

La manufactura sincronizada, es una forma sistemática de mover materiales de forma rápida y fluida a través de los diversos recursos de la planta de acuerdo con la demanda del mercado. Equilibra los flujos de materiales de su empresa conociendo y explotando las limitaciones de su proceso de producción, administrándolas de manera inteligente para maximizar el rendimiento y luego sincronizando el resto del proceso de producción para garantizar que no se produzca, desperdicie o desperdicie ningún trabajo en curso, tiempo o descanso hasta el límite creado.

La producción sincrónica se refiere a todo el proceso de producción trabajando en armonía entre sí para lograr los objetivos de la empresa, debe tener orientación para tomar decisiones sobre el presente y el futuro de manera objetiva y coherente con las decisiones realizadas en el pasado. Esto es parte de la respuesta para encontrar un consenso global sobre las decisiones que afectan la planificación de la producción, la comprensión y publicación de estos estándares por parte de la alta dirección, y la comprensión y aplicación de estos principios a todos los miembros de la empresa dentro de la empresa para tomar las decisiones correctas para el propósito general de la organización.

2.4.1. El método DBR

Drum Buffer Roper (DBR) es un método de planificación de la producción para lograr una producción sincrónica. La fabricación sincrónica es una forma sistemática de mover materiales de forma rápida y fluida a través de los diversos activos de una planta de acuerdo con la demanda del mercado.

La manufactura sincrónica tiene como objetivo reducir el impacto de las fluctuaciones estadísticas en la interacción de las actividades en una empresa de fabricación, ya que este DBR se basa en tres componentes principales.

El Tambor (Drum). Todas las fábricas tienen al menos de uno a varios cuellos de botella, el nodo limitante de capacidad máxima (CCR) que gobierna la tasa de producción de la fábrica, este recurso es el tambor, es el recurso que determina el nivel de ritmo de producción.

El amortiguador (buffer). Necesita protección La capacidad de la planta está controlada por la tasa de producción, la congestión (CCR). La protección es asegurarse de que no tengan

retrasos en la producción debido a la falta de suministro, además de que hay un amortiguador temporal para entrar en cuellos de botella y CCR.

El buffer de tiempo es para asegurar que el producto llegue al sitio de producción antes de lo que realmente necesita el centro de trabajo, pero no afecta la gestión de inventario de la fábrica.

La cuerda (Rope). La función de la cuerda es garantizar que el inventario no crezca más de lo necesario al coordinar la tasa de liberación de material en la planta con la primera operación, es decir, la liberación de material a una tasa de amortiguación temporal están frente al cuello de botella [37].

2.5 Modelos de sincronización

El término sincronización puede tener varios significados según el contexto en el que se haga referencia. Uno de los enfoques más populares en la literatura donde se definen la sincronización como "el ajuste fino de los ritmos de los cuerpos oscilantes causados por la interacción débil de los objetos oscilantes". En este sentido, mucho trabajo se ha centrado en explicar conceptos como objeto oscilante, ritmo, interacción y regulación del ritmo, pero la definición general de sincronización no incluye necesariamente el objeto herramienta. En este artículo, entenderemos por sincronización la relación entre los estados de un conjunto de partículas que interactúan. Las formas de interacción entre partículas pueden ser variadas y complejas [34].

Modelos clásicos: campo medio y exponentes críticos

Uno de los temas de mayor interés en el estudio de la materia son las transiciones de fase, procesos en los que se producen transformaciones significativas de una o varias propiedades macroscópicas de la sustancia en la que se encuentran. A medida que ocurre la transición de fase, las partículas del sistema exhiben correlación en todas las escalas. En esta situación, cerca del punto crítico (determinado por variables termodinámicas estimadas en el punto de transición) donde las fases son indistinguibles, pueden ocurrir oscilaciones a toda escala. En algunos materiales, estas oscilaciones son tan notorias que pueden cambiar radicalmente la óptica, térmica, conductiva y más.

Otra consecuencia muy importante de las correlaciones en todas las escalas es que las propiedades importantes no deberían depender de la naturaleza de las fuerzas microscópicas (de corto alcance) que definen el sistema. Esta observación ha sido confirmada experimentalmente en varios casos. Por ejemplo, si ciertas analogías se establecen exactamente cerca de sus puntos críticos, entonces los líquidos y los imanes se comportan de la misma forma cualitativa y cuantitativa [38].

2.6. Sistemas discretos

2.6.1. Sistemas y modelos

El término "sistema" se usa a menudo en muchos sentidos, tantos que es difícil dar una definición única que los abarque a todos sin dejar de ser lo suficientemente preciso para fines específicos. Podemos comenzar definiendo un sistema como una colección de cosas que, en una relación ordenada entre sí, forman un todo definido. Esta es una definición simplista, pero revela las características básicas de lo que constituye el llamado enfoque de sistemas: mirar el todo en lugar de las partes individuales, con énfasis en las relaciones entre los sistemas más objetivos del sistema, especialmente importantes para los sistemas artificiales.

Como se describe en la introducción de esta monografía, el enfoque visionario o de sistemas es una consecuencia de la transición de la filosofía reduccionista a la filosofía holística, en la que los determinantes de la Naturaleza son colecciones, como los organismos, que no se pueden reducir en la suma de sus partes, y la evolución del universo es el resultado de estos números enteros. En otras palabras, creía que el todo no podía reducirse a elementos individuales y enfatizaba las relaciones funcionales u orgánicas entre las partes y el todo. La referencia anterior apunta al papel del biólogo Ludwig von Bertalanffy al generalizar la aplicación de estas ideas a grupos organizados de cualquier tipo, a los que llamamos sistemas.

19 Modelado de sistemas La orientación a la resolución de problemas del sistema postula que el comportamiento de cualquier parte tiene cierta influencia en el comportamiento de todo el sistema, durante su desarrollo desde En 1920 se superpuso e interactuó con varias disciplinas dando como resultado lo que se conoce como sistemas ingeniería hoy, un método que utiliza el conocimiento de diferentes campos de la ciencia y la tecnología para introducir innovaciones tecnológicas en las etapas de concepción, planificación, desarrollo y operación

del sistema o, por lo tanto, el ciclo de vida del sistema. Una de las principales características de los métodos de ingeniería de sistemas es su uso en situaciones donde los sistemas:

- 1) Grandes y complejos.
- 2) En ellos interviene el hombre.
- 3) El cambio en una parte puede afectar a muchas otras y al todo.

Un ejemplo, conceptualmente simple, de lo que consideraremos los siguientes sistemas, tomado del texto cuasi-original de Gordon y cercano a la vida real, es este último. Considere una fábrica que fabrica y ensambla varias partes para crear el producto final (Figura 2.5). Como primera aproximación a la descripción del sistema, podemos suponer que sus dos componentes principales son la sala de producción que produce las piezas y la sala de ensamblaje que produce los productos finales. También hay un departamento de compras para asegurar el suministro de materias primas y un departamento de expedición para encargarse de la distribución de los productos terminados. El control de producción toma órdenes y distribuye órdenes de trabajo a otros departamentos.

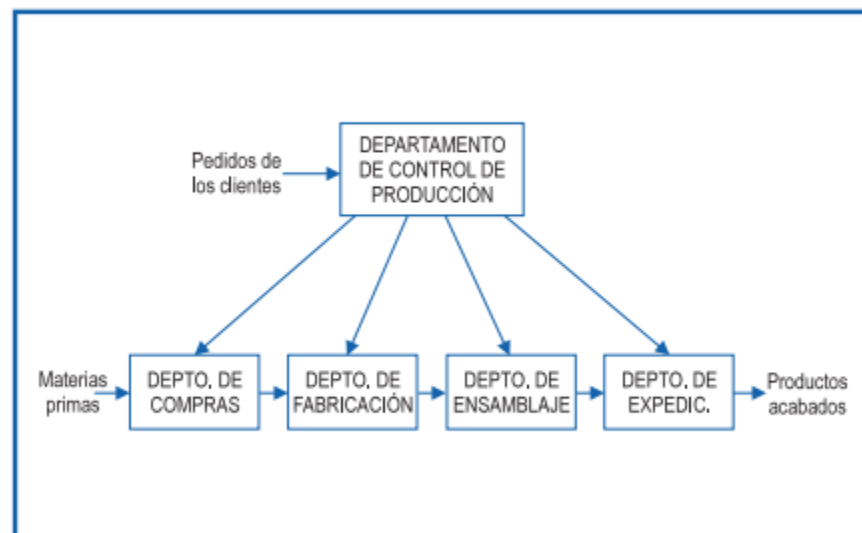


Figura 2.5. Factoría como sistema (Barceló, J. 1996)

2.6.2. Definición

Para los sistemas discretos, el seguimiento de los cambios de estado requiere determinar qué causó el cambio y cuándo provocó ese cambio, lo que llamamos un evento, luego las ecuaciones del modelo. La figura se convierte en una ecuación lógica y las dependencias

definen las condiciones bajo las cuales ocurre el evento. . Este tipo de sistema corresponde al modelo de red de colas de producción, en el que los cambios de estado son provocados por eventos discretos, como la llegada de una pieza o la finalización de una operación. Este tipo de simulación, conocida como simulación discreta, rastrea los cambios en el estado del sistema debido a una secuencia de eventos [39].

2.7. Elementos de monitoreo

2.7.1. Monitoreo

La teoría de la planificación del desarrollo define el seguimiento o monitoreo como una actividad que determina de manera sistemática el desempeño de un sistema, subsistema o proceso con el fin de realizar los ajustes o cambios adecuados y oportunos para lograr resultados e impacto ambiental. Como resultado, el seguimiento le permite analizar el progreso y recomendar acciones a tomar para alcanzar las metas; Identifique los éxitos o fracasos reales o potenciales lo antes posible y realice los ajustes de rendimiento oportunos.

Dado el amplio consenso sobre el propósito del monitoreo como se describe en el párrafo anterior, actualmente hay dos tendencias con respecto al valor y alcance de los sistemas de monitoreo o seguimiento. Las tendencias enfatizan la coincidencia entre lo planeado y lo sucedido. El segundo es el conocimiento adquirido como resultado de acciones posteriores.

La primera tendencia se basa en una visión racional del proceso de planificación. Por lo tanto, se supone que se obtendrán ciertos productos y eficiencias con ciertos productos. De acuerdo con esta tendencia, las actividades de seguimiento se centran en “analizar sistemáticamente el proceso de implementación, con criterios de cuanta o poca convergencia del plan con la realidad”. Por lo tanto, el foco está en verificar la implementación del plan y recomendar cambios para reducir la diferencia entre un momento y el siguiente.

Siguiendo otra tendencia, el monitoreo tiene como objetivo "probar la corrección de una hipótesis, proporcionar retroalimentación y así tomar decisiones estratégicas y operativas basadas en datos empíricos", y así, el monitoreo se traduce en "la producción y gestión de conocimiento empírico y una fuente de conocimiento". , contribuyendo a una mayor utilidad y eficiencia.

2.7.2. Elementos del plan de monitoreo

El plan de seguimiento incluye la secuencia de actividades requeridas para medir y analizar los resultados, estas actividades incluyen el desarrollo de un plan o declaración, un cuadro de mando y un marco de objetivos.

Plan o Declaración: Esta sección describe la razón de ser o el propósito de la iniciativa en relación con la realidad que pretende cambiar. Esta importancia se expresa en la forma en que se conciben las actividades, los resultados, las metas y los efectos deseados. Cuadro de mando: cada objetivo, resultado o producto se mide mediante una serie de métricas relevantes (unidades de medida), persona responsable y fuente de recopilación de datos de rendimiento. A veces, los valores de los indicadores se desglosan en aspectos más detallados. Por ejemplo, en el índice de 'población de estudiantes avanzados', podría ser interesante desglosarlos por: i) región del país; ii) niño o niña; iii) Nativo o no nativo.

Período objetivo: este componente te permite especificar el comportamiento de las métricas en un período de tiempo específico que debes especificar (trimestral, semestral, anual, etc.). Los indicadores se pueden medir o comparar con líneas de base pasadas o con objetivos establecidos para un período de tiempo futuro específico.

El monitoreo es cíclico, lo que significa que gira continuamente en torno a acentos funcionales que van desde la recopilación de datos hasta intervenciones de énfasis o redirección en vestiduras. La Figura 2.6 muestra los elementos del ciclo de monitoreo y cómo se relacionan entre sí.

A modo de ilustración, los elementos del ciclo de seguimiento se describen a continuación. Recopile datos de fuentes establecidas y luego regístrelos en las herramientas apropiadas; Compare los datos con los niveles de cumplimiento esperados; Decidir sobre las acciones correctivas o respuestas necesarias de acuerdo con la información recibida; El despliegue tomará acciones correctivas o responderá.

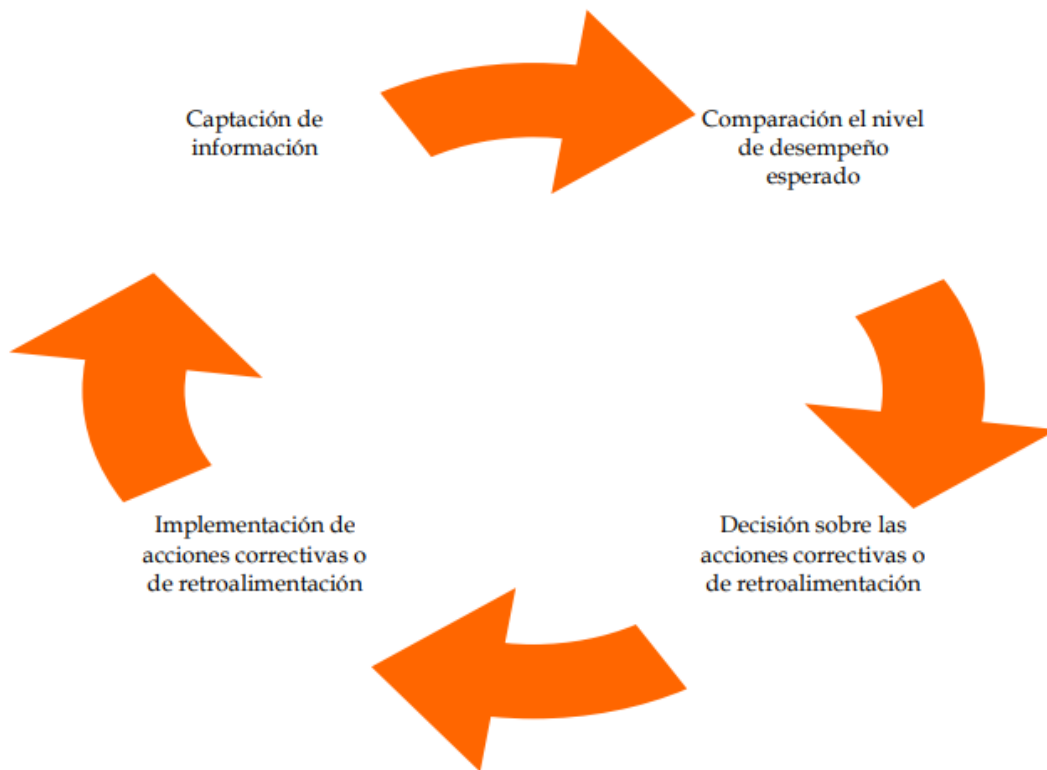


Figura 2.6. Secuencia del monitoreo

2.7.3. Indicadores

Las métricas son esencialmente información utilizada para monitorear y ajustar las acciones de un sistema, subsistema o proceso para que coincida con su misión, metas y objetivos. Los indicadores como unidad de medida le permiten rastrear y medir variables organizacionales clave comparándolas a lo largo del tiempo con estándares externos e internos.

Se atribuyen dos funciones principales a los indicadores: función descriptiva, que incluye brindar información sobre el estado actual de la actividad o proyecto, programa, política, etc.; y una función de evaluación para agregar información lo más objetivamente descriptiva posible sobre si los resultados son apropiados para guiar la toma de decisiones posteriores, que es parte del ciclo de monitoreo.

Características de los indicadores

No existe un conjunto claro de "métricas de ajuste" para medir los niveles de rendimiento. Hay varias señales posibles para medir la variabilidad de las variables con distintos grados de confianza. Las referencias de los autores a las características de los indicadores varían hacia arriba o hacia abajo, pero en general un "buen indicador" se caracteriza por su capacidad de ser medido; Exactamente; Consistencia; y sensible.

Medible: El indicador debe ser medible o cualitativo. El indicador más útil es que permite comparar la situación medida con la situación esperada. Esto se facilita si, en la planificación, la formulación de la misión y el establecimiento de objetivos, la construcción se lleva a cabo de manera que pueda medirse durante el seguimiento y la evaluación.

Preciso: Los indicadores deben estar claramente definidos, es decir, no debe permitirse ninguna interpretación o duda sobre el tipo de datos recopilados. Durante el monitoreo, diferentes personas recopilarán datos para medir el indicador porque se cubrirán grandes áreas (por ejemplo, territorios nacionales) o porque los datos se recopilarán durante un período de tiempo prolongado (período de regla). En estos casos, posiblemente debido a la rotación del personal, nuevas personas pueden ser responsables de la recopilación y el análisis de datos. En todos los casos, es importante que todos los recolectores de datos midan de la misma manera, lo cual está respaldado por métricas precisas.

Sensibilidad: Finalmente, es muy importante que el indicador sea sensible. El índice de sensibilidad cambiará proporcionalmente y en la misma dirección que los cambios en el estado o concepto que se puede medir [40].

CAPÍTULO III- METODOLOGÍA

En este capítulo se describirán la metodología utilizada para realizar la elaboración del presente proyecto que tiene como objetivo el diseño de la metodología para la automatización de sistemas productivos seriales. Se explica el enfoque, tipo y diseño de investigación, el objeto de estudio, así como los materiales e instrumentos y procedimiento que se realizaron para la elaboración del proyecto.

3.1 Tipo de Investigación

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo, es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y debido al diseño de las piezas, no es posible eludir pasos. El orden es riguroso, aunque desde luego, se puede redefinir alguna fase. Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivaron los objetivos y preguntas de investigación, se revisó la literatura y se construyó el marco teórico. De las preguntas generadas se estableció la hipótesis, se desarrolló el procedimiento, y se trazó un plan, se generó una serie de conclusiones y recomendaciones.

3.2 Diseño de Investigación

Este proyecto tiene un diseño de Investigación Descriptivo ya que busca detallar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice, describiendo el proceso del diseño de una pieza (un grupo, población). Este proyecto presenta a través de una metodología paso a paso como sincronizar y automatizar el proceso de realización de una pieza en un sistema productivo serial. Es una investigación no experimental ya que no se aplicó ningún experimento. Es una Investigación transeccional o transversal ya que la metodología se realizó en un solo momento, en un tiempo único que fue el periodo de duración del posgrado agosto 2021- mayo 2023.

3.3 Hipótesis y Variables

3.3.1 Hipótesis de Investigación y Nula

Hipótesis de Investigación (Hi): Contar con una metodología, como mecatrónico una herramienta que facilitará la sincronización de sistemas productivos seriales con su conjunto de métodos y pasos jerárquicos detallados.

Hipótesis Nula (Ho): La metodología no resultó para el usuario una herramienta sencilla para la sincronización de sistemas productivos seriales.

3.3.2 Variables

Tabla 3.1 Descripción de Variables de estudio.

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional
Dependiente Grafcet	GRAFCET se compone de varios elementos en un flujo de trabajo lógico. Estos elementos se distribuyen en etapas, acciones asociadas y transiciones, todo a través de procesos secuenciales. En un sistema utilizando GRAFCET, siempre se debe arrancar con una etapa inicial. Enseguida se pueden agregar etapas normales o de estados estabilizados. (FluidSim, s.f)	Se usará para crear la simulación de la planta utilizando las ecuaciones de estado de control generales obtenidas en la metodología
Independiente Metodología	Como metodología se denomina la serie de métodos y técnicas de rigor científico que se aplican sistemáticamente durante un proceso de investigación para alcanzar un resultado teóricamente válido. En este sentido, la metodología funciona como el soporte conceptual que rige la manera en que aplicamos los procedimientos en una investigación.	Documento desarrollado indicando el paso a paso la sincronización y automatización de un sistema productivo serial

3.4 Objeto de Investigación

El objeto de investigación fue el proceso de la realización una metodología para la sincronización y automatización de un sistema productivo serial

3.5 Materiales e Instrumentos

- Computadora con las siguientes características: Para ejecutar los software necesarios para trabajar en el proyecto de manera óptima se necesita Windows 10, 64 Bits, procesador de 3,3 GHz o superior, tarjeta gráfica y controladores certificados y memoria RAM de 8 GB o más.
- EXCEL 2016: Aplicación de la suite de Office 2016 que permite la realización del modelo discreto Código Binario Operacional Referencial (CBOR)
- Investigación documental, se realizó una búsqueda y recuperación, análisis e interpretación de información obtenida por otros investigadores, fuentes documentales, manuales impresos y audiovisuales.
- Entrevista con expertos. Se realizaron entrevistas con: Experto en el área de desarrollo de manuales y procedimientos para la ingeniería el Dr. Eusebio Jiménez López

3.6 Metodología para la planeación, sincronización y la automatización de sistemas productivos seriales

Fase 1: Ingeniería Industrial

Estudio sobre la producción y estudio de las características del producto.

- 1.1) Estudio sobre el volumen de producción pedido, generación del Tiempo de producción Unitario (TpU).
- 1.2) Estudio sobre la viabilidad económica de la producción solicitada.
- 1.3) Estudio técnico de la producción (Análisis de capacidades, proveedores).
- 1.4) Sistematización de la información geométrica y no geométrica del producto.
 - a) Estudio del plano de fabricación o,
 - b) Desarrollo de la ingeniería inversa.
- 1.5) Sistematización de la información de materiales y procesos.

- a) Estudio del plano de fabricación o,
 - b) Desarrollo de la ingeniería inversa.
- 1.6) Estudio o creación de los planos de diseño, fabricación y hoja de proceso (**generación de los tiempos fijos**).
- 1.7) Análisis y distribución de planta (**Maquinaria y flujo de materiales**).
- 1.8) Desarrollo de un informe técnico de la fase.

Fase 2: Diseño de la sincronización de procesos

Estudio sobre la distribución sistemática de tiempos y sensores en las líneas de producción.

- 2.1) Sincronización local
 - 1) Crónica de procesos
 - 2) Modularización
 - 3) Diseño de ciclos
 - 4) Distribución de tiempos
 - 5) Tabla de sincronización local
- 2.2) Sincronización global
 - 1) Diseño preliminar de CBOR
 - 2) Llenado de CBOR
 - 3) Supermódulo
 - 4) Extensión de CBOR
 - 5) CBOR funcional
- 2.3) Desarrollo de un informe técnico de la fase

Fase 3: Diseño del control del proceso

Estudio sobre el modelo del control del sistema de producción sincronizado.

3.1) Condiciones de sensado bandera condicional

3.2) Diseño de paro de emergencia

3.3) Diseño del sistema de control

3.4) CBOR operacional

3.5) Diseño de sistema de automatización robusto

3.5.1) Estudio de los ciclos completos de cada máquina (ida y vuelta)

3.5.2) Asignación de sensado de vuelta

3.5.3) Modificación de CBOR (Inserción del nuevo sensado)

3.5.4) Sistematización del sensado robusto de cada módulo

3.5.5) Modificación de las tablas de control

3.5.6) Representación de los estados y transiciones de elementos de trabajo

3.5.7) Diseño de las ecuaciones de estado para cada elemento

3.5.8) Tabla de ecuaciones de estado final

3.6) Modelado de sistemas discretos

3.6.1) Grafcet

3.6.2) StateChart

3.7) Simulación

3.7.1) Construcción de la planta en FluimSim

3.7.2) Asignación de entradas y salidas en Grafcet

3.7.3) Creación de los estados y transiciones respecto a las ecuaciones de estado

3.7.4) Pruebas y ajustes

3.8) Desarrollo de un informe técnico de la fase

Fase 4: Automatización

Diseño de los sistemas automatizados y control

4.1) Análisis de las instalaciones y equipos

4.1) Sistema de aire

4.2) Equipamiento

4.2) Análisis de las secuencias de operaciones

4.3) Diseño de los diagramas espacio-tiempo

4.4) Interpretación del CBOR operacional

4.5) Selección de los elementos de mando principal

4.6) Diseño de circuitos neumáticos y electroneumáticos

4.7) Desarrollo de la representación por GRAFCET

4.8) Interpretación de la información del GRAFCET

4.9) Diseño del diagrama escalera del PLC

4.10) Simulación de la automatización

4.11) Desarrollo de un informe técnico de la fase

Fase 5: Implementación

Implementación de la sincronización física o simulada.

5.1) Interpretación de los informes técnicos de las fases anteriores

5.2) Desarrollo del simulador

5.3) Armado del sistema mecánico

- 5.4) Armando del sistema de mando principal
- 5.5) Armado del sistema sensórico.
- 5.6) Armando del monitoreo
- 5.7) Armando y programación del sistema de procesamiento de datos (PLC)
- 5.8) Ajustes y calibración
- 5.9) Pruebas de campo
- 5.10) Reajustes
- 5.11) Puesta en marcha
- 5.12) Desarrollo de un informe técnico de la fase

CAPÍTULO IV- RESULTADOS

4.1 Diseño de la sincronización de procesos

En esta parte se presenta la aplicación de los pasos descritos por el Doctor Jiménez para sincronizar local y globalmente una línea de producción secuencial. La pieza de trabajo y sus principales operaciones de manufactura se describen en la Figura 4.1

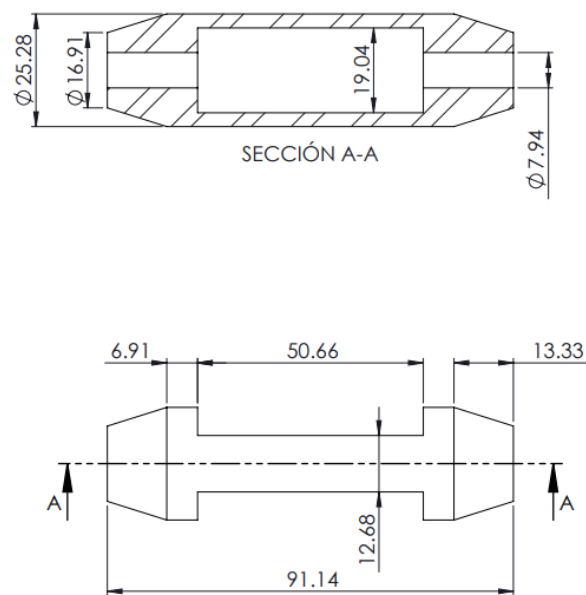


Figura 4.1 Pieza de trabajo y sus operaciones de manufactura

El Tiempo de producción Unitaria (TpU) es de 240 seg/pieza. La Tabla 4.1 muestra los tiempos fijos.

Operación	Tiempos fijos (seg)
Refrentar	3.6
Maquinado de conicidad	3.6
Corte	4.2
Taladrado a centro	2.4
Taladrado ciego	13.8
Fresado de aproximación 1	19.2
Fresado de acabado	1.89
Evaluación de calidad	5
Toma de decisión (pasa/no pasa)	2

Tabla 4.1 Tiempos Fijos

La distribución de planta propuesta se muestra en la Figura 4.2.

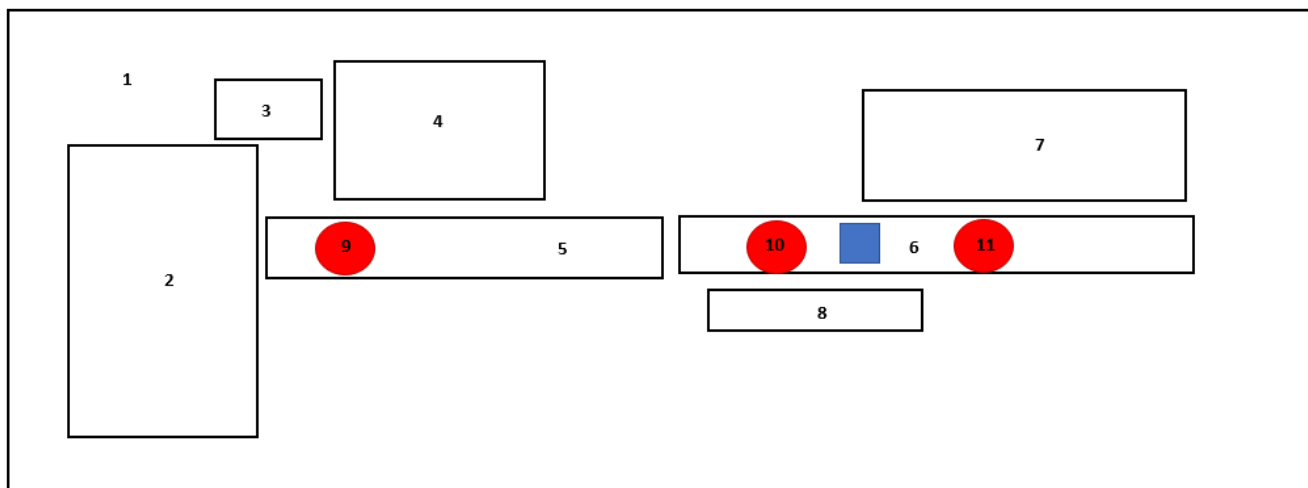


Figura 4.2 Distribución de planta y puntos estratégicos.

A continuación, se muestra la nomenclatura de la simbolización de la distribución:

1.- Área alrededor de las máquinas:

Largo: 889 cm

Ancho: 275 cm

Alto: 183 cm

2.- Torno PC Turn 155

Largo: 158 cm

Ancho: 117.5 cm

Alto: 176 cm

3.- Almacén de materia prima:

Largo: 111.2 cm

Ancho: 70 cm

Alto: 116 cm

4.- Fresadora PC Mill 155

Largo: 142 cm

Ancho: 125 cm

Alto: 176 cm

5.- Guía del robot:

Largo: 326 cm

Ancho: 33 cm

Alto: 91 cm

6.- Banda transportadora:

Largo: 350 cm

Ancho: 18 cm

Alto: 91 cm

7.- Almacén cartesiano:

Largo: 239 cm

Ancho: 81.5 cm

Alto: 212 cm

8.- Almacén de desperdicios:

Largo: 100 cm

Ancho: 13 cm

Alto: 91 cm

Robots y Pallets (dimensiones):

9.-: Mitsubishi RV-1A/RV-2AJ (inspección)

Altura máx.: 688 cm

Largo: 832 cm

Ancho: 176 cm

10.- Mitsubishi Industrial Robot RV.E2

Largo: 697 cm

Ancho: 230 cm

Alto: 787 cm

11.- Pallet:

Largo: 16 cm

Ancho: 16 cm

Alto: 2 cm

Medidas (distancias):

12.- Distancia puerta del torno- Donde está montado el robot: 30 cm

13.- Distancia centro del sujetador fresadora – Tapa cierre automático (puerta): 41 cm

14.- Distancia Almacén materia prima- Guía del robot: 48.5 cm

15.- Distancia Brazo robótico (Guía del robot)- Entrada de la puerta del Torno: 133 cm

16.- Distancia Pallet almacén – Banda transportadora: 49 cm

La crónica de proceso se describe a continuación:

Crónica de proceso:

El robot R1 toma la pieza del Almacén 1 en el punto A y la traslada al punto B. Al posicionarse en el punto B, el sensor abre las compuertas del torno y R1 introduce la pieza al punto C, iniciando la operación de la M1. Al terminar, R1 traslada la pieza del punto C al punto D, pasando por el punto B. Al estar en el punto D, el sensor abre las compuertas de la fresadora y R1 introduce la pieza al punto E, iniciando la operación de la M2. Una vez concluida la operación, R1 traslada la pieza del punto E al punto D, para transportarla al punto F. Al posicionarse en F, la R2 comienza la operación de fotografiado para comprobar la calidad de la pieza; si se encuentra en buenas condiciones sigue sobre la banda, de lo contrario, R2 toma la pieza y lo deja sobre Almacén 3, para después regresar a su posición original. La B1 traslada la pieza al punto G donde R3 la toma y la traslada al punto H, dentro del Almacén 2, para después regresar a su posición original.

Crónica de sensado:

El S0 detecta la presencia de la pieza y da salida a R1 para que la transporte de A a C. En el punto C, Sc detecta la llegada de la pieza a M1 y empieza a operar. Xc se activa cuando termina la operación, lo que da entrada al robot para realizar el giro de la pieza, activando Xc1 para iniciar de nuevo la operación. Después, Xc2 detecta el término de la operación y da entrada a R1 para que transporte la pieza al punto D activando el sensor Sd, que hace que se transporte la pieza al punto E. Se detecta la presencia de la pieza mediante el sensor Se e inicia la operación de la M2, que activa Xe cuando termina, provocando que R1 transporte la pieza al punto F sobre la B1. Al llegar, se activa Sf y empieza la operación de R2, que al

terminar activa el sensor X_f y la pieza continúa sobre B1. Al llegar al punto G, se activa S_g provocando que R3 traslade la pieza al punto H, que a su vez activa al sensor S_h indicando la llegada de esta.

4.1.1 Consideraciones para la sincronización de procesos.

Con el propósito de conocer los alcances de la metodología de la sincronización local, a continuación, se describen algunas consideraciones que deben tomarse en cuenta:

- 1) Los puntos estratégicos solo señalan inicio y término de un transporte.
- 2) La distribución de planta es fija y conocida.
- 3) La maquinaria de operación y de transporte opera en términos perfectos.
- 4) Los tiempos de proceso se representan por números enteros.
- 5) Las operaciones de manufactura son perfectas.
- 6) Solo se toman en cuenta los eventos que produce un sensor. En otras palabras, se considera sensado perfecto.
- 7) La distribución de tiempos se realiza por asignación sobre las rutas de trabajo.
- 8) Se considera la maquinaria opera bajo los rangos admisibles de diseño.

El término de perfecto se refiere a que no se toman en cuenta para aspectos de sincronización algunas características de las operaciones, de las máquinas y de los sensores. Para efectos de esta tesis, se dice que el sistema es sincronizable, pues se cumple con:

Un sistema de manufactura se dice sincronizable si existe un tiempo $I \gg 1$ pero menor que el T_{pU} tal que:

$$T_{pU} = \Sigma T_F + I$$

Ecuación 1. Ecuación de sincronización

Donde, ΣT_F es la sumatoria de los tiempos fijos (no modificables) de las operaciones de manufactura.

De acuerdo con este proceso, $\Sigma T_F = 60$ seg y el $T_{pU} = 240$ seg, por lo que:

$I=180$ seg.

El hecho de que “I” sea grande ($I \gg 1$), implica que es posible distribuir tiempos sobre los ciclos de operación de las máquinas, por lo que el sistema es sincronizable.

4.3.2 Distribución de sensores y modularización.

Para poder tener control de las diversas acciones en una línea de producción, es necesario establecer un sistema de sensado. Para el caso de los sensores primarios o principales la siguiente relación debe cumplirse:

$$NSP=NPE$$

Donde, NSP es en número de sensores principales y NPE es el número de posiciones estratégicas. Observe en la Figura 4.2 que son 6 posiciones estratégicas (posiciones al inicio y al final de una operación de transporte), por lo tanto: $NPE=6$, y, en consecuencia, $NSP=6$.

Estos sensores solo sensan piezas de trabajo y dan salida a la máquina sucesora. La distribución de estos sensores se desarrolla según la secuencia de ubicación de los puntos estratégicos. La Figura 4.3 muestra la distribución de sensores principales. Por otro lado, el sistema de sensado de ida está compuesto por sensores principales y sensores de completud. Estos últimos son necesarios pues por lo general al realizar una crónica de sensado se

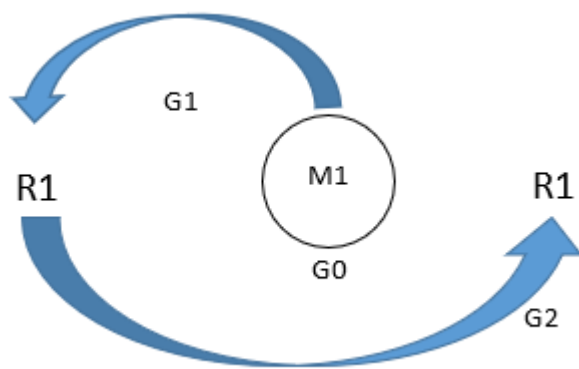
Módulo o agrupación	Antecedora			Máquina principal	Sucesora	Sucesora
Módulo 1	R1	-	-	M2	R1	-
Módulo 2	R1	M2	R1	R2	B1	R3

Tabla 4.2 Modularización

4.1.2 Vórtices y agrupación de máquinas

En esta parte se desarrollan los vórtices de sincronización local y los grupos de máquinas con los cuales se sincronizarán cada máquina y los grupos de cada módulo. El objetivo de la conformación de grupos es distribuir los tiempos de proceso en forma sistemática, particularmente entre las máquinas antecesoras y sucesoras en torno a la máquina principal. La Figura 4.4 muestra la creación de los vórtices con sus antecesores y sucesores.

Módulo 1



Módulo 2

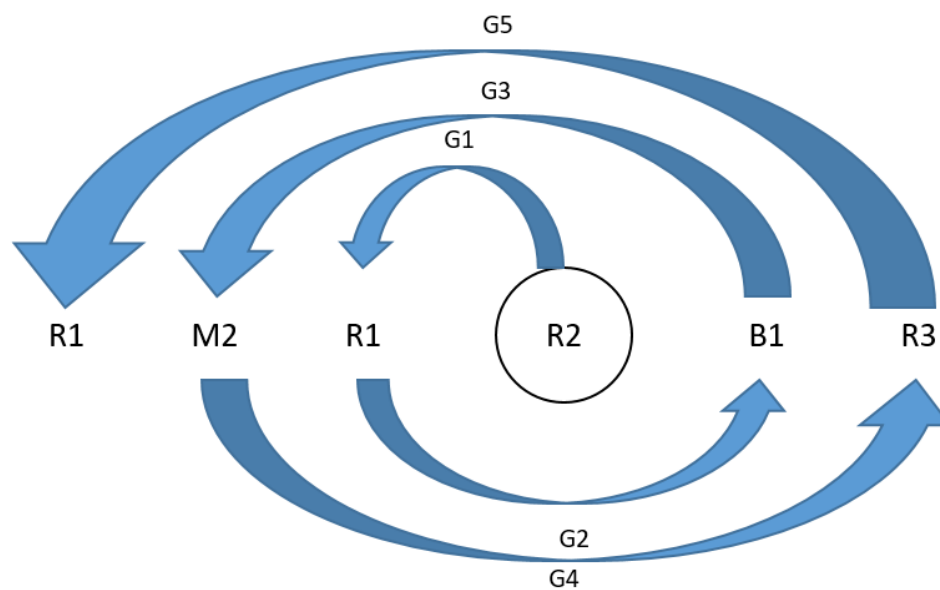


Figura 4.4 Vórtices: 1) Antecesor perfecto, 2) Sucesor perfecto.

Los grupos de sincronización se resumen a continuación:

Módulo 1:

$G_0 = \{M_1\}$

$G_1 = \{R_1, M_1\}$

$G_2 = \{R_1, M_1, R_1\}$

Módulo 2:

$G_0 = \{R_2\}$

$G_1 = \{R_1, R_2\}$

$G_2 = \{R_1, R_2, B_1\}$

$G_3 = \{M_2, R_1, R_2, B_1\}$

$G_4 = \{M_2, R_1, R_2, B_1, R_3\}$

$G_5 = \{R_1, M_2, R_1, R_2, B_1, R_3\}$

4.1.3 Ciclos de operación y distribución de tiempos de proceso.

En esta sección se diseñan los ciclos operativos de las máquinas que integran los módulos de producción siguiendo los grupos de sincronización descritos en la sección anterior. Para lograr los objetivos se proponen las consideraciones siguientes:

- Los ciclos de las máquinas principales se diseñan completamente.
- Los ciclos de las máquinas de transporte solo se desarrollan en lo general.

La metodología para la distribución de los tiempos es la siguiente:

- 1) Seleccionar un módulo y sus grupos de máquinas.
- 2) Diseñar cada uno de las trayectorias de los ciclos operativos.

- 3) Distribuir los tiempos sobre cada grupo de máquinas empezando por el G0 y luego el G1 y así sucesivamente.
- 4) Una vez distribuidos los tiempos sobre la o las máquinas del grupo G0 ya no debe haber modificaciones a ese grupo.
- 5) Para el caso de las máquinas de G1 se debe seguir la siguiente regla: Asignar todo el tiempo posible del regreso de la máquina del G0 a la o las trayectorias de ida de la máquina del G1.
- 6) Para el caso de las máquinas de G2 se debe seguir la siguiente regla: Se debe asignar una porción de tiempo de ida de la máquina del grupo G1 a las trayectorias de la máquina del grupo G2.
- 7) Para el caso de las máquinas del grupo G3 se sigue el mismo procedimiento de distribución asociado a las máquinas del G2 considerando que si el tiempo es considerable, se pueden asignar porciones de las idas de grupo G1 y G2.
- 8) Se sigue el mismo procedimiento para los grupos siguientes.
- 9) Se sigue el mismo procedimiento para todos los módulos de la línea de producción.
- 10) La distribución de tiempos debe cumplir la regla siguiente: En cada distribución y ajuste de tiempos se debe cumplir que el tiempo de ciclo T_{TC} cumpla con:

$$T_{TC} \leq T_{pU}$$

$$T_{TC} = T_{TIDA} + T_{TVUELTA}$$

Ecuación 2. Ecuación de tiempo de ciclo

Siendo T_{TIDA} y $T_{TVUELTA}$ los tiempos de ida y de vuelta, respectivamente. Además, $T_{TVUELTA}$ se representa por:

$$T_{TVUELTA} = T_{TREGRESO} + T_E$$

Ecuación 3. Ecuación tiempo de vuelta

Donde, T_E es un tiempo de espera tal que:

- Si $T_E = 0$, entonces la máquina opera a ciclo continuo y,
- Si $T_E \neq 0$, entonces la máquina opera a ciclo intermitente.

11) La distribución de tiempos debe cumplir la regla siguiente: En cada distribución y ajuste de tiempos se debe cumplir que la sumatoria de los tiempos de ida cumpla con:

$$\Sigma T_{IDAGRUP0} = T_{pU}$$

12) En relación con el tiempo de regreso se tiene que:

$$T_{TREGRESO} = T_{TREGRESO 1} + T_{TREGRESO 2}$$

Ecuación 4. Ecuación tiempo de regreso

Siendo $T_{TREGRESO 1}$ el tiempo que transcurre entre la finalización de la operación principal (si es una máquina principal) y la activación del sensor de completud, $T_{TREGRESO 2}$ es el tiempo medido entre la activación del sensor de completud y el origen de la trayectoria (origen del ciclo). El tiempo $T_{TREGRESO 1}$ a pesar de que es un tiempo de regreso, generalmente se suma al tiempo total de ida por la acción del sensor de completud y se simboliza por “±”, en tanto que el tiempo $T_{TREGRESO 2}$ es clave para la sincronización de procesos, pues el método propone que el máximo tiempo disponible del ciclo (que no sea tiempos de ida) sea el $T_{TREGRESO 2}$, ya que dicho tiempo se reparte en las trayectorias de ida y de vuelta de las máquinas que componen al módulo de producción. Por consiguiente, un $T_{TREGRESO 2}$ muy corto ocasionaría una distribución de tiempos muy limitada lo que implicaría que las máquinas sucesoras y antecesoras del módulo operen en el límite superior o crítico de sus parámetros operacionales (PO).

13) Una máquina opera en forma sincronizada con el TpU si y sólo si:

$$T_{TC} = T_{TIDA} + T_{TVUELTA} + TE = TpU$$

Ecuación 5. Ecuación de tiempo de ciclo

La Figura 4.5 muestra la distribución de tiempos en el módulo 1 y 2, y la Tabla 4.3 muestra el concentrado de la información de la sincronización local.

Módulo 1

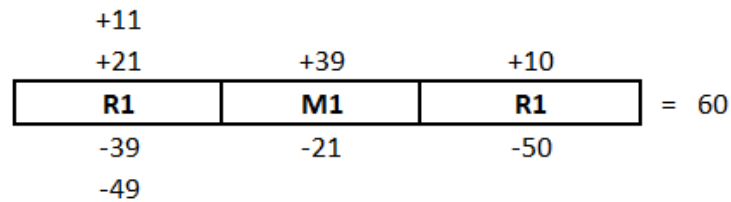


Figura 4.5 Distribución de tiempos en el módulo 1

Módulo 2

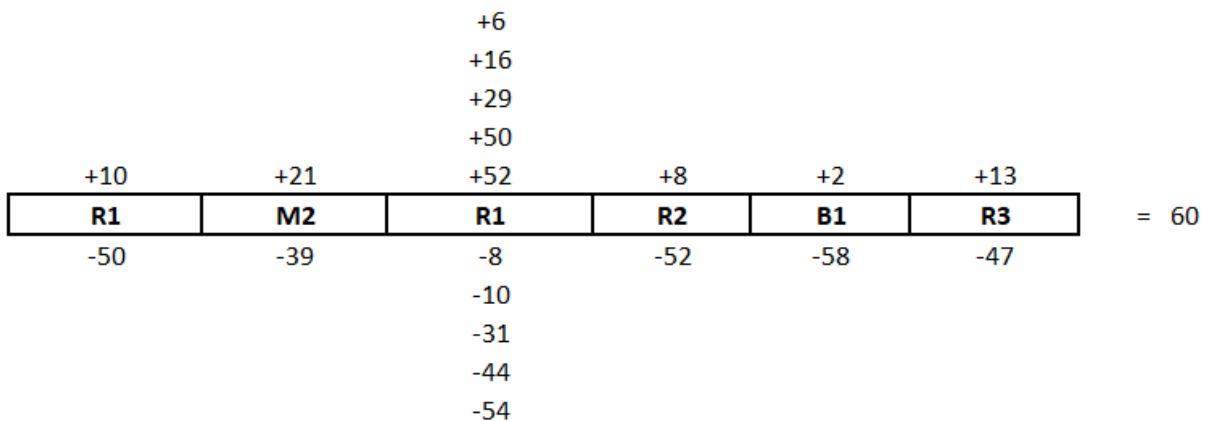


Figura 4.6 Distribución de tiempos en el módulo 2

Máquina	Ida	Vuelta	Espera	TC	Sensores	Acumulado ida
R1	11	11	38	Intermitente	S0-Sc	11
M1	39	0	21	Intermitente	Sc-Xc2	50
R1	10	10	40	Intermitente	Xc2-Sd	60
R1	10	10	40	Intermitente	Sd-Se	70
M2	21	0	39	Intermitente	Se-Xe	91
R1	6	10	44	Intermitente	Xe-Sf	97
R2	8	4	48	Intermitente	Sf-Xf	105
B1	2	58	0	Ida pura	Xf-Sg	107
R3	13	8	39	Intermitente	Sg-Sh	120

Tabla 4.3 Tablas de sincronización local

4.1.4 Proceso de la sincronización global.

La sincronización global tiene el propósito proporcionar información para diseñar el control de la maquinaria de tal manera que el sistema productivo pueda generar una producción global a TpU. Durante el proceso de la sincronización local cada módulo de producción fue sincronizado a TpU, por lo que al pasar las materias primas por dichos módulos el tiempo de producción sería 2TpU; esto es, 120 seg. Sin embargo, el TpU total de la planta debe ser de 60 seg/pieza.

4.1.4.1 Diseño preliminar el CBOR

De acuerdo con Jiménez et al, (2003), el diseño preliminar del CBOR es la generación de las matrices Tiempo- Sensado y Maquinaria Tiempo. La Tabla 4.4 muestra el CBOR preliminar relacionado el proceso de manufactura motivo de estudio en este trabajo de tesis.

CBOR																							
Matriz Tiempo-Sensado										Matriz Maquinado-Tiempo													
MÓDULO 1				MÓDULO 2						MÓDULO 1		MÓDULO 2		MÓDULO 1					MÓDULO 2				
X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9					Y0	Y1	Y2	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	
S0	Sc	Xc2	Sd	Se	Xe	Sf	Xf	Sg	Sh					R1	M1	R1	R1	M2	R1	R2	B1	R3	
t/s																							
t1																							
t2																							
t3																							
t4																							
t5																							
t6																							
t7																							
t8																							
t9																							
t10																							
t11																							
t12																							
t13																							
t14																							
t15																							
t16																							
t17																							
t18																							
t19																							
t20																							
t21																							
t22																							
t23																							
t24																							
t25																							
t26																							
t27																							
t28																							
t29																							
t30																							
t31																							
t32																							
t33																							
t34																							
t35																							
t36																							
t37																							
t38																							
t39																							
t40																							
t41																							
t42																							
t43																							
t44																							
t45																							
t46																							
t47																							
t48																							
t49																							
t50																							
t51																							
t52																							
t53																							
t54																							
t55																							
t56																							
t57																							
t58																							
t59																							
t60																							

[illegible]

67

El símbolo “1/0” representa el cambio de estado de los sensores. El número de líneas de control de ida es igual al número de sensores de ida.

Para que el CBOR sea operacional referencial se sigue la siguiente proposición:

El tiempo que transcurre durante el cambio de estado de un sensor o de un conjunto de sensores es igual al tiempo de cambio de estado de la operación de una máquina y, por lo tanto, despreciable.

Las líneas de control también son representativas de los cambios de estado en la señal de salidas de las máquinas.

4.1.4.3 Inserción de los tiempos de ida y de vuelta en la MMT

El llenado de los ciclos se realiza de la manera siguiente:

- 1) Primero se llenan los tiempos de ida.
- 2) Posteriormente los tiempos de vuelta.
- 3) Los tiempos de ida se señalizan con 1.
- 4) Los tiempos de vuelta con un -1.
- 5) La transición con un 1/0.
- 6) El llenado se realiza siguiendo el recorrido de ida, máquina a máquina.
- 7) El llenado de los tiempos de ida y vuelta deben representar los ciclos completos.
- 8) Si los tiempos de vuelta sobrepasan el CBOR preliminar, entonces el CBOR se extiende hasta que todo el ciclo o ciclos de las máquinas quede representado.

Las Tablas 4.6 y 4.7 muestran la inserción de los tiempos de ida y de vuelta, respectivamente.

CBOR																					
Matriz Tiempo-Sensado											Matriz Maquinado-Tiempo										
MÓDULO 1					MÓDULO 2						MÓDULO 1					MÓDULO 2					
t/s	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	m/t		
	S0	Sc	Xc2	Sd	Se	Xe	Sf	Xf	Sg	Sh	R1	M1	R1	R1	M2	R1	R2	B1	R3		
lc0	1-0										1										lc0
t1											1									t1	
t2											1									t2	
t3											1									t3	
t4											1									t4	
t5											1									t5	
t6											1									t6	
t7											1									t7	
t8											1									t8	
t9											1									t9	
t10											1									t10	
t11											1									t11	
lc1	1-0																				lc1
t12											1									t12	
t13											1									t13	
t14											1									t14	
t15											1									t15	
t16											1									t16	
t17											1									t17	
t18											1									t18	
t19											1									t19	
t20											1									t20	
t21											1									t21	
t22											1									t22	
t23											1									t23	
t24											1									t24	
t25											1									t25	
t26											1									t26	
t27											1									t27	
t28											1									t28	
t29											1									t29	
t30											1									t30	
t31											1									t31	
t32											1									t32	
t33											1									t33	
t34											1									t34	
t35											1									t35	
t36											1									t36	
t37											1									t37	
t38											1									t38	
t39											1									t39	
t40											1									t40	
t41											1									t41	
t42											1									t42	
t43											1									t43	
t44											1									t44	
t45											1									t45	
t46											1									t46	
t47											1									t47	
t48											1									t48	
t49											1									t49	
t50											1									t50	
lc2	1-0																				lc2
t51												1								t51	
t52												1								t52	
t53												1								t53	
t54												1								t54	
t55												1								t55	
t56												1								t56	
t57												1								t57	
t58												1								t58	
t59												1								t59	
t60												1								t60	
lc3	1-0																				lc3
t61													1							t61	
t62													1							t62	
t63													1							t63	
t64													1							t64	
t65													1							t65	
t66													1							t66	
t67													1							t67	
t68													1							t68	
t69													1							t69	
t70													1							t70	
lc4	1-0																				lc4

CBOR																					
Matriz Tiempo-Sensado										Matriz Maquinado-Tiempo											
MÓDULO 1										MÓDULO 2											
MÓDULO 1										MÓDULO 2											
X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y0	Y1	Y2	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	m/t		
X0	Sc	Xc2	Sd	Se	Xe	Sf	Xf	Sg	Sh	R1	M1	R3	R1	M2	R1	R2	B1	R3			
ic0	1-0										1										ic0
11										1									11		
12										1									12		
13										1									13		
14										1									14		
15										1									15		
16										1									16		
17										1									17		
18										1									18		
19										1									19		
110										1									110		
111										1									111		
ic1	1-0										-1	1								ic1	
112										-1	1								112		
113										-1	1								113		
114										-1	1								114		
115										-1	1								115		
116										-1	1								116		
117										-1	1								117		
118										-1	1								118		
119										-1	1								119		
120										-1	1								120		
121										-1	1								121		
122										-1	1								122		
123										0	1								123		
124										0	1								124		
125										0	1								125		
126										0	1								126		
127										0	1								127		
128										0	1								128		
129										0	1								129		
130										0	1								130		
131										0	1								131		
132										0	1								132		
133										0	1								133		
134										0	1								134		
135										0	1								135		
136										0	1								136		
137										0	1								137		
138										0	1								138		
139										0	1								139		
140										0	1								140		
141										0	1								141		
142										0	1								142		
143										0	1								143		
144										0	1								144		
145										0	1								145		
146										0	1								146		
147										0	1								147		
148										0	1								148		
149										0	1								149		
150										0	1								150		
ic2	1-0										0	0	1							ic2	
151										0	0	1							151		
152										0	0	1							152		
153										0	0	1							153		
154										0	0	1							154		
155										0	0	1							155		
156										0	0	1							156		
157										0	0	1							157		
158										0	0	1							158		
159										0	0	1							159		
160										0	0	1							160		
ic3	1-0										0	-1	1							ic3	
161										0	-1	1							161		
162										0	-1	1							162		
163										0	-1	1							163		
164										0	-1	1							164		
165										0	-1	1							165		
166										0	-1	1							166		
167										0	-1	1							167		
168										0	-1	1							168		
169										0	-1	1							169		
170										0	-1	1							170		
ic4	1-0										0	0	-1	1						ic4	
171										0	0	-1	1						171		
172										0	-1	1							172		
173										0	-1	1							173		
174										0	-1	1							174		
175										0	-1	1							175		
176										0	-1	1							176		
177										0	-1	1							177		
178										0	-1	1							178		
179										0	-1	1							179		
180										0	-1	1							180		
181										0	0	1							181		
182										0	0	1							182		
183										0	0	1							183		
184										0	0	1							184		
185										0	0	1							185		
186										0	0	1							186		
187										0	0	1							187		
188										0	0	1							188		
189										0	0	1							189		
190										0	0	1							190		
191										0	0	1							191		
ic5	1-0																			ic5	

[illegible]

Tabla 4.7 Inserción de los tiempos de vuelta

El CBOR se ha extendido como consecuencia de que los ciclos de las máquinas no ha había representado en forma completa.

4.1.4.4 Construcción del supermódulo

Una vez llenado el CBOR con los tiempos de ida y vuelta, el objetivo ahora es superponer el módulo 1 sobre el módulo 2. El llenado del supermódulo se realiza de la manera siguiente:

- 1) Primero se insertan las líneas de control del módulo 1 sobre el módulo 2, tomando en cuenta el siguiente procedimiento: La primera línea de control del módulo 1 se coloca

(superpone) en la primera línea de control del módulo 1 y sólo se marca con el símbolo 1/0 y con un color diferente.

- 2) Si la inserción de una línea de control del módulo 1 no queda en una línea de control del módulo 2 entonces se coloca toda la línea de control del módulo 1.
- 3) Una vez realizada la superposición de las líneas de control del módulo 1 sobre el módulo 2, se procede al llenado de los tiempos de ida y de vuelta del módulo 1 sobre el módulo 2.

Las Tablas 4.8 y 4.9 muestran el proceso de construcción del supermódulo.

		Matriz Tiempo-Sensado										Matriz Maquinado-Tiempo										m/h				
		MÓDULO 1				MÓDULO 2						MÓDULO 1		MÓDULO 2		MÓDULO 1								MÓDULO 2		
		X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9					Y0	Y1	Y2	Y2	Y3	Y4		Y5	Y6	Y7	
		S0	Sr	Nc2	Sd	Se	Se	Sf	Sr	Sg	Sh					R1	M1	R1	R1	N02	R1		R2	B1	R3	
1/5																										
1c0		1-0																								
11																										
12																										
13																										
14																										
15																										
16																										
17																										
18																										
19																										
110																										
111																										
1c1		1-0																								
112																										
113																										
114																										
115																										
116																										
117																										
118																										
119																										
120																										
121																										
122																										
123																										
124																										
125																										
126																										
127																										
128																										
129																										
130																										
131																										
132																										
133																										
134																										
135																										
136																										
137																										
138																										
139																										
140																										
141																										
142																										
143																										
144																										
145																										
146																										
147																										
148																										
149																										
150																										
1c2		1-0																								
151																										
152																										
153																										
154																										
155																										
156																										
157																										
158																										
159																										
160																										
1c3		1-0		1-0																						
161																										
162																										
163																										
164																										
165																										
166																										
167																										
168																										
169																										
170																										
1c4					1-0																					
171																										
1c1		1c1																								
172																										
173																										
174																										
175																										
176																										
177																										
178																										
179																										
180																										
181																										
182																										
183																										
184																										
185																										
186																										
187																										
188																										
189																										
190																										
191																										
1c5						1-0																				

Tabla 4.8 Inserción de las líneas de control del módulo 1 sobre el módulo 2

CBDR																					
Matriz Tiempo-Sensado											Matriz Maquinado-Tiempo										
MÓDULO 1					MÓDULO 2					MÓDULO 1			MÓDULO 2								
X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9		Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7			
S0	Sc	Xc2	Sd	Se	Xe	Sf	Xf	Sg	Sh		R1	M1	R1	R1	M2	R1	R2	B1	R3		
ic0	1-0																				ic0
i1											1								i1		
i2											1								i2		
i3											1								i3		
i4											1								i4		
i5											1								i5		
i6											1								i6		
i7											1								i7		
i8											1								i8		
i9											1								i9		
i10											1								i10		
i11											1								i11		
ic1	1-0																				ic1
i12											-1	1							i12		
i13											-1	1							i13		
i14											-1	1							i14		
i15											-1	1							i15		
i16											-1	1							i16		
i17											-1	1							i17		
i18											-1	1							i18		
i19											-1	1							i19		
i20											-1	1							i20		
i21											-1	1							i21		
i22											-1	1							i22		
i23											0	1							i23		
i24											0	1							i24		
i25											0	1							i25		
i26											0	1							i26		
i27											0	1							i27		
i28											0	1							i28		
i29											0	1							i29		
i30											0	1							i30		
i31											0	1							i31		
i32											0	1							i32		
i33											0	1							i33		
i34											0	1							i34		
i35											0	1							i35		
i36											0	1							i36		
i37											0	1							i37		
i38											0	1							i38		
i39											0	1							i39		
i40											0	1							i40		
i41											0	1							i41		
i42											0	1							i42		
i43											0	1							i43		
i44											0	1							i44		
i45											0	1							i45		
i46											0	1							i46		
i47											0	1							i47		
i48											0	1							i48		
i49											0	1							i49		
i50											0	1							i50		
ic2	1-0																				ic2
i51											0	0	1						i51		
i52											0	0	1						i52		
i53											0	0	1						i53		
i54											0	0	1						i54		
i55											0	0	1						i55		
i56											0	0	1						i56		
i57											0	0	1						i57		
i58											0	0	1						i58		
i59											0	0	1						i59		
i60											0	0	1						i60		
ic3	1-0			1-0																ic3	
i61											1	0	-1	1					i61		
i62											1	0	-1	1					i62		
i63											1	0	-1	1					i63		
i64											1	0	-1	1					i64		
i65											1	0	-1	1					i65		
i66											1	0	-1	1					i66		
i67											1	0	-1	1					i67		
i68											1	0	-1	1					i68		
i69											1	0	-1	1					i69		
i70											1	0	-1	1					i70		
ic4					1-0															ic4	
i71											1	0	0	-1	1				i71		
ic1'	ic1'																				ic1'
i72											-1	1	0	-1	1				i72		
i73											-1	1	0	-1	1				i73		
i74											-1	1	0	-1	1				i74		
i75											-1	1	0	-1	1				i75		
i76											-1	1	0	-1	1				i76		
i77											-1	1	0	-1	1				i77		
i78											-1	1	0	-1	1				i78		
i79											-1	1	0	-1	1				i79		
i80											-1	1	0	-1	1				i80		
i81											-1	1	0	0	1				i81		
i82											-1	1	0	0	1				i82		
i83											0	1	0	0	1				i83		
i84											0	1	0	0	1				i84		
i85											0	1	0	0	1				i85		
i86											0	1	0	0	1				i86		
i87											0	1	0	0	1				i87		
i88											0	1	0	0	1				i88		
i89											0	1	0	0	1				i89		
i90											0	1	0	0	1				i90		
i91											0	1	0	0	1				i91		
ic5						1-0														ic5	

Tabla 4.9 Inserción de los tiempos de ida y vuelta del módulo 1 sobre el módulo 2

El objetivo ahora es conformar un CBOR base o funcional. Para lograr desarrollar dicho CBOR se debe seguir el procedimiento siguiente:

- 1) Se cuenta el número de tiempos de vuelta que están en la extensión del CBOR.
- 2) Se selecciona el mayor (si hay dos iguales se selecciona solo uno de ellos).
- 3) Debido a que son tiempos, se debe ubicar la línea de control de inicio del módulo anterior, y posteriormente copiar todo el bloque que cubra el número de tiempos de vuelta y superponerlo en el bloque de la extensión del CBOR.

- 4) Debe de copiarse hasta la línea de control que está por debajo del último tiempo de vuelta.
- 5) Posteriormente se debe enumerar los tiempos en forma progresiva y las líneas de control.
- 6) El resultado final es el CBOR base.

La Tabla 4.10 muestra el CBOR funcional.

		CBOR																									
		Matriz Tiempo-Sensado										Matriz Maquinado-Tiempo															
		MÓDULO 1				MÓDULO 2						MÓDULO 1		MÓDULO 2		MÓDULO 1				MÓDULO 2							
		X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	R0	R1			R2	R3		
V/s	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	my/t		
1-0																										1c0	
11																										11	
12																										12	
13																										13	
14																										14	
15																										15	
16																										16	
17																										17	
18																										18	
19																										19	
110																										110	
111																										111	
1c1																										1c1	
112																										112	
113																										113	
114																										114	
115																										115	
116																										116	
117																										117	
118																										118	
119																										119	
120																										120	
121																										121	
122																										122	
123																										123	
124																										124	
125																										125	
126																										126	
127																										127	
128																										128	
129																										129	
130																										130	
131																										131	
132																										132	
133																										133	
134																										134	
135																										135	
136																										136	
137																										137	
138																										138	
139																										139	
140																										140	
141																										141	
142																										142	
143																										143	
144																										144	
145																										145	
146																										146	
147																										147	
148																										148	
149																										149	
150																										150	
1c2																										1c2	
151																										151	
152																										152	
153																										153	
154																										154	
155																										155	
156																										156	
157																										157	
158																										158	
159																										159	
160																										160	
1c3																										1c3	
161																										161	
162																										162	
163																										163	
164																										164	
165																										165	
166																										166	
167																										167	
168																										168	
169																										169	
170																										170	
1c4																										1c4	
171																										171	
1c1'																										1c1'	
172																										172	
173																										173	
174																										174	
175																										175	
176																										176	
177																										177	
178																										178	
179																										179	
180																										180	
181																										181	
182																										182	
183																										183	
184																										184	
185																											

t92										0	1	0	0	0	1			t92	
t93										0	1	0	0	0	1			t93	
t94										0	1	0	0	0	1			t94	
t95										0	1	0	0	0	1			t95	
t96										0	1	0	0	0	1			t96	
t97										0	1	0	0	0	1			t97	
ic6								1-0										ic6	
t98										0	1	0	0	0	-1	1		t98	
t99										0	1	0	0	0	-1	1		t99	
t100										0	1	0	0	0	-1	1		t100	
t101										0	1	0	0	0	-1	1		t101	
t102										0	1	0	0	0	-1	1		t102	
t103										0	1	0	0	0	-1	1		t103	
t104										0	1	0	0	0	-1	1		t104	
t105										0	1	0	0	0	-1	1		t105	
ic7								1-0										ic7	
t106										0	1	0	0	0	-1	-1	1	t106	
t107										0	1	0	0	0	-1	-1	1	t107	
ic8								1-0										ic8	
t108										0	1	0	0	0	0	-1	-1	1	t108
t109										0	1	0	0	0	0	-1	-1	1	t109
t110										0	1	0	0	0	0	0	-1	1	t110
ic2'								1-0										ic2'	
t111										0	0	1	0	0	0	0	-1	1	t111
t112										0	0	1	0	0	0	0	0	1	t112
t113										0	0	1	0	0	0	0	0	1	t113
t114										0	0	1	0	0	0	0	0	1	t114
t115										0	0	1	0	0	0	0	0	1	t115
t116										0	0	1	0	0	0	0	0	1	t116
t117										0	0	1	0	0	0	0	0	1	t117
t118										0	0	1	0	0	0	0	0	1	t118
t119										0	0	1	0	0	0	0	0	1	t119
t120										0	0	1	0	0	0	0	0	1	t120
ic9								1-0										ic9	
t121										1	0	-1	1					t121	
t122										1	0	-1	1					t122	
t123										1	0	-1	1					t123	
t124										1	0	-1	1					t124	
t125										1	0	-1	1					t125	
t126										1	0	-1	1					t126	
t127										1	0	-1	1					t127	
t128										1	0	-1	1					t128	
t129										1	0	-1	1					t129	
t130										1	0	-1	1					t130	
ic4								1-0										ic4	

Tabla 4.10 CBOR funcional

4.1.5. Diseño del control de proceso.

Para desarrollar el control se hará uso de la información del CBOR funcional y de las siguientes consideraciones:

- 1) Un sistema productivo tiene asociado un ciclo de control de arranque, cuya consideración es que cada sensor de ida dé salida a la máquina sucesora.
- 2) Un ciclo automático que se construye sobre las líneas de control de inicio y término de un módulo cuya función de control es garantizar que existan condiciones para que la diferencia temporal entre la primera pieza que se produce y la segunda sea el TpU.
- 3) Un conjunto de líneas de control relacionadas con el control operacional que incluye condicionantes y sistemas de paros de emergencia, cuyo diseño requiere de nuevas líneas de control, nuevos elementos de señalización y nuevas ecuaciones de estado.
- 4) Todos los eventos de control se dan sobre las líneas de control.
- 5) La inserción de sensado bandera modifica al CBOR.

Para facilitar el diseño del sistema de control se hará uso de una Tabla que va a modificarse según el siguiente procedimiento:

- 1) Se construye una tabla cuya primea columna tiene las líneas de control de ida.
- 2) La segunda columna tiene las ecuaciones del ciclo de arranque.
- 3) La tercera columna representa las ecuaciones del ciclo automático.
- 4) La cuarta columna representa las ecuaciones de estado entre ciclo de arranque y el ciclo automático.
- 5) La quinta columna representa las ecuaciones del sensado bandera condicional.
- 6) La sexta columna representa las ecuaciones de estado del sensado bandera relacionado con los paros de emergencia.
- 7) La séptima columna representa el ensamble 2 que establece el control total.
- 8) La octava columna representa los comentarios de cada ecuaciones de estado.

La Tabla 4.11 muestra el control de procesos de la línea de producción motivo de estudio en este trabajo de tesis.

Diagrama escalera							
Lineas de control	Ciclo de arranque	Ciclo automatico	Ensamble 1	Sensado bandera condicional	Sensado de emergencia	Ensamble 2 o modelo final	Comentarios finales
lc0	$Y0=1*X0$	$Y0=1*X0$	$Y0=1*X0$	$Y0=X0*X10$	$Y0=X0*X10*(X20)$	$Y0=X0*X10*(X20)$	Sensado bandera
lc1	$Y1=1*X1$		$Y1=1*X1$		$Y1=1*X1*(X20)$	$Y1=1*X1*(X20)$	
lc2	$Y2=1*X2$		$Y2=1*X2$		$Y2=1*X2*(X20)$	$Y2=1*X2*(X20)$	
lc3	$Y3=1*X3$	$Y3=1*X3*X0',$ $Y0'=1*X0''*X3$	$Y3=1*X3*X0',$ $Y0'=1*X0''*X3$		$Y3=1*X3*X0'*(X20),$ $Y0'=1*X0''*X3*(X20)$	$Y3=1*X3*X0'*(X20),$ $Y0'=1*X0''*X3*(X20)$	
lc4	$Y4=1*X4$		$Y4=1*X4$		$Y4=1*X4*(X20)$	$Y4=1*X4*(X20)$	
lc5	$Y5=1*X5$		$Y5=1*X5$		$Y5=1*X5*(X20)$	$Y5=1*X5*(X20)$	
lc6	$Y6=1*X6$		$Y6=1*X6$		$Y6=1*X6*(X20)$	$Y6=1*X6*(X20)$	
lc7	$Y7=1*X7$		$Y7=1*X7$		$Y7=1*X7*(X20)$	$Y7=1*X7*(X20)$	
lc8	$Y8=1*X8$		$Y8=1*X8$		$Y8=1*X8*(X20)$	$Y8=1*X8*(X20)$	
lc9		$Y3'=1*X3'*X0''*X9,$ $Y0''=1*X0''*X3''*X9$	$Y3'=1*X3'*X0''*X9,$ $Y0''=1*X0''*X3''*X9$		$Y3'=1*X3'*X0''*X9*(X20),$ $Y0''=1*X0''*X3''*X9*(X20)$	$Y3'=1*X3'*X0''*X9*(X20),$ $Y0''=1*X0''*X3''*X9*(X20)$	

Tabla 4.11 Ecuaciones de estado para el control de procesos

De acuerdo con la Tabla anterior, el control del proceso se establece en la columna con el nombre ensamble 2 o modelo final; esto es, dicho control establece una relación directa entre en ciclo de arranque y el automático.

Finalmente, el control total es el que se implementa en un dispositivo electrónica, como por ejemplo un PLC.

4.1.6. Ecuaciones de estado de ida.

A continuación se presentan las ecuaciones de estados que están asociadas al control operacional del sistema.

$$Y0=X0*X10*(X20)$$

$$Y1=1*X1*(X20)$$

$$Y2=1*X2*(X20)$$

$$Y3=1*X3*X0'*(X20), Y0'=1*X0'*X3*(X20)$$

$$Y4=1*X4*(X20)$$

$$Y5=1*X5*(X20)$$

$$Y6=1*X6*(X20)$$

$$Y7=1*X7*(X20)$$

$$Y8=1*X8*(X20)$$

$$Y3'=1*X3'*X0''*X9*(X20), Y0''=1*X0''*X3'*X9*(X20)$$

El siguiente CBOR que se mostrará incluye todo lo anterior desarrollado, que es el sensado bandera completa y las ecuaciones de estado incluidas.

		CBOR																																	
		Matriz Tiempo-Sensado								Matriz Magnitud-Tiempo																									
		MODULO 1				MODULO 2				Sensores bandera				MODULO 1				MODULO 2																	
		X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7										
		S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9								
		Sensores bandera																Matriz Magnitud-Tiempo																	

4.2 Automatización.

Para poder lograr la automatización del proceso es necesario centrar la atención en el sensado y las acciones realizadas por cada máquina, teniendo señales a lo largo de todo el ciclo. Para esto se necesitan tener las siguientes consideraciones:

- La detección de una máquina de transporte al final del recorrido de ida.
- El regreso de cada máquina.
- La verificación de las máquinas cuando lleguen a home.
- La activación de los dispositivos integrados a la maquinaria que interactúan directamente con el proceso.

Las consideraciones anteriores requieren de la generación y envío de señales, de esta manera el sistema tiene las suficientes señales para una eficaz operación. Para conseguir una automatización robusta, se necesita tomar en cuenta cada máquina por separado y completar su señalización de acuerdo con los estados asociados.

Para conseguir la automatización de este proyecto se realizarán las siguientes consideraciones:

- En caso de ser necesario se utilizarán timer (temporizadores)
- Se introducirá una nueva nomenclatura para los nuevos sensores.
- No se tomarán en cuenta las condiciones de control vistas en la sección de la sincronización, si no que se propondrán nuevas.
- Se considerarán los paros de emergencia hasta el final del proceso de sensorizado robusto.

La siguiente tabla muestra el sensado robusto del módulo 1

R1	Acción	Sensa a:	Ciclo	Tipo	Nuevo
S0	Enciende a R1	Pieza	IDA	Principal	NO
SF11	Apaga a R1	Maquina	IDA	Bandera	SI
TE11	Enciende a R1	No aplica	VUELTA	Bandera (Temporizador)	SI
SH11	Apaga a R1	Maquina	VUELTA	Bandera (Sensado de Home)	SI
M1	Acción	Sensa a:	Ciclo	Tipo	Nuevo
Sc	Enciende a M1	Pieza	IDA	Principal	NO
SF21	Apaga a M1	Maquina	IDA	Bandera	SI
TE21	Enciende a M1	No aplica	VUELTA	Bandera (Temporizador)	SI
SH21	Apaga a M1	Maquina	VUELTA	Bandera (Sensado de Home)	SI
R1	Acción	Sensa a:	Ciclo	Tipo	Nuevo
Xc2	Enciende a R1	Pieza	IDA	Principal	NO
SF31	Apaga a R1	Maquina	IDA	Bandera	SI
TE31	Enciende a R1	No aplica	VUELTA	Bandera (Temporizador)	SI
SH31	Apaga a R1	Maquina	VUELTA	Bandera (Sensado de Home)	SI

Tabla 4.13 Sensado robusto del módulo 1

La siguiente tabla muestra el sensado robusto del módulo 2

R1	Acción	Sensa a:	Ciclo	Tipo	Nuevo
Sd	Enciende a R1	Pieza	IDA	Principal	NO
SF41	Apaga a R1	Maquina	IDA	Bandera	SI
TE41	Enciende a R1	No aplica	VUELTA	Bandera (Temporizador)	SI
SH41	Apaga a R1	Maquina	VUELTA	Bandera (Sensado de Home)	SI
M2	Acción	Sensa a:	Ciclo	Tipo	Nuevo
Se	Enciende a M2	Pieza	IDA	Principal	NO

SF51	Apaga a M2	Maquina	IDA	Bandera	SI
TE51	Enciende a M2	No aplica	VUELTA	Bandera (Temporizador)	SI
SH51	Apaga a M2	Maquina	VUELTA	Bandera (Sensado de Home)	SI
R1	Acción	Sensa a:	Ciclo	Tipo	Nuevo
Xe	Enciende a R1	Pieza	IDA	Principal	NO
SF61	Apaga a R1	Maquina	IDA	Bandera	SI
TE61	Enciende a R1	No aplica	VUELTA	Bandera (Temporizador)	SI
SH61	Apaga a R1	Maquina	VUELTA	Bandera (Sensado de Home)	SI
R2	Acción	Sensa a:	Ciclo	Tipo	Nuevo
Sf	Enciende a R2	Pieza	IDA	Principal	NO
SF71	Apaga a R2	Maquina	IDA	Bandera	SI
TE71	Enciende a R2	No aplica	VUELTA	Bandera (Temporizador)	SI
SH71	Apaga a R2	Maquina	VUELTA	Bandera (Sensado de Home)	SI
B1	Acción	Sensa a:	Ciclo	Tipo	Nuevo
Xf	Enciende a B1	Pieza	IDA	Principal	NO
SF81	Apaga a B2	Maquina	IDA	Bandera	SI
R3	Acción	Sensa a:	Ciclo	Tipo	Nuevo
Sg	Enciende a R3	Pieza	IDA	Principal	NO
Sh	Apaga a R3	Maquina	IDA	Principal	NO
TE91	Enciende a R3	No aplica	VUELTA	Bandera (Temporizador)	SI
SH91	Apaga a R3	Maquina	VUELTA	Bandera (Sensado de Home)	SI

Tabla 4.14 Sensado robusto del módulo 2

Lo siguiente es modificar el CBOR desde el CBOR operacional agregando la inserción del sensado global de automatización en el CBOR funcional.

		Matriz Tiempo-Sensado																											
MÓDULO 1				MÓDULO 2																									
X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22	X23	X24	X25	X26	X27	X28	X29
S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	SF01	TE01	SH01	SF21	TE21	SH21	SF31	TE31	SH31	SF41	TE41	SH41	SF51	TE51	SH51	SF61	TE61	SH61	SF71	TE71
ic0	ic1	ic2	ic3	ic4	ic5	ic6	ic7	ic8	ic9																				
t1	t2																												

Tabla 4.15 CBOR con sensado robusto

Para iniciar el proceso de automatización se tomará la Tabla 4.11 la cual se reenumerará; esto es:

Diagrama escalera							
Lineas de control	Ciclo de arranque	Ciclo automatico	Ensamble 1	Sensado bandera condicional	Sensado de emergencia	Ensamble 2 o modelo final	Comentarios finales
lc0	Y0=1*X0	Y0=1*X0	Y0=1*X0				
lc1	Y1=1*X1		Y1=1*X1				
lc2	Y2=1*X2		Y2=1*X2				
lc3	Y3=1*X3	Y3=1*X3*X0', Y0'=1*X0'*X3	Y3=1*X3*X0', Y0'=1*X0'*X3				
lc4	Y4=1*X4		Y4=1*X4				
lc5	Y5=1*X5		Y5=1*X5				
lc6	Y6=1*X6		Y6=1*X6				
lc7	Y7=1*X7		Y7=1*X7				
lc8	Y8=1*X8		Y8=1*X8				
lc9		Y3'=1*X3'*X0'*X9, Y0'=1*X0'*X3'*X9	Y3'=1*X3'*X0'*X9, Y0'=1*X0'*X3'*X9				

Tabla 4.16.Tabla de inicio para la automatización

La siguiente tabla muestra la nueva configuración para realizar la automatización.

Diagrama escalera							
Lineas de control	Ciclo de arranque	Ciclo automatico	Ensamble 1	Sensado bandera robusto	Sensado bandera condicional	Sensado de emergencia	Ensamble 2 o modelo final
lc0	Y0=1*X0	Y0=1*X0	Y0=1*X0				
lc1	Y1=1*X1		Y1=1*X1				
lc2	Y2=1*X2		Y2=1*X2				
lc3	Y3=1*X3	Y3=1*X3*X0', Y0'=1*X0'*X3	Y3=1*X3*X0', Y0'=1*X0'*X3				
lc4	Y4=1*X4		Y4=1*X4				
lc5	Y5=1*X5		Y5=1*X5				
lc6	Y6=1*X6		Y6=1*X6				
lc7	Y7=1*X7		Y7=1*X7				
lc8	Y8=1*X8		Y8=1*X8				
lc9		Y3'=1*X3'*X0'*X9, Y0'=1*X0'*X3'*X9	Y3'=1*X3'*X0'*X9, Y0'=1*X0'*X3'*X9				

Tabla 4.17. Tabla final para el inicio de la automatización

Lo siguiente es desarrollar las ecuaciones de estado de los los sensados de vuelta mostrados en la tabla anterior.

- Ecuaciones de estado para sensado robusto del módulo 1

Aquí se diseñarán las ecuaciones de estado para el sensado robusto de las máquinas que componen el módulo 1.

- Condicionales operativos para el Actuador R1

Se puede representar los estados y las transiciones del actuador R1 en un ciclo de operación de acuerdo con la tabla siguiente:

R1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Tipo	Tiempos de ciclo
E11	Detenido (inicio)	Enciende a R1 (y0)	S ₀	X0_ON, X0_OFF	x1_ON→ E11	Principal	11
E12	Yendo (Ida)	Apaga a R1 (y0)	S _{F11}	x11_ON x11_OFF	x11_ON→ E12	Bandera	+5
E13	Detenido (final de carrera)	Enciende a R1 (y0)	T _{E11}	X12_ON X12_OFF	X12_ON→ E13	Bandera (Temporizador)	0
E14	Regresando (Vuelta)	Apaga a R1 (y0)	S _{H11}	X13_ON X13_OFF	X13_ON→ E14	Bandera (Sensado de Home)	-4

Tabla 4.18 Estados y transiciones actuador R1

La representación de la información servirá para dos propósitos:

- 1) Para generar las ecuaciones de estado del CBOR.
- 2) Para modelar con máquinas estado (statecharts) la celda de manufactura.

Para el caso de las ecuaciones de estado del actuador R1, se requieren los siguientes condicionantes:

El actuador R1 no se enciende si los sensores S₀ y S_{H11} no están activos al mismo tiempo.

Esta condición se modela de la manera siguiente:

$$Y0 = x0 \bullet x13$$

Suponiendo que:

$$\bullet = \text{and}$$

Entonces:

$$X0_ON \text{ and } x13_ON \rightarrow E11 (y0)$$

El actuador R1 se detiene al final de su carrera (S_{F11}):

$$Y0=1 \bullet x11$$

$$x11_ON \rightarrow E12 (y0)$$

El actuador R1 espera un segundo por medio de un temporizador (T_{E11}):

$$Y0=1 \bullet x12$$

$$x12_ON \rightarrow E13 (y0)$$

El actuador R1 se detiene en Home (S_{H11}):

$$Y0= 1 \bullet x13$$

$$X13_ON \rightarrow E14 (y0)$$

R1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Ecuación general	Ecuación de estado
E11	Detenido (inicio)	Enciende a R1 (y0)	S ₀	X0_ON, X0_OFF	X0_ON→ E11	$y0=x0 \bullet x13$	X0_ON and x13_ON → E11 (y0)
E12	Yendo (Ida)	Apaga a R1 (y0)	S _{F11}	x11_ON x11_OFF	x11_ON→ E12	$y0=1 \bullet x11$	x11_ON → E12 (y0)
E13	Detenido (final de carrera)	Enciende a R1 (y0)	T _{E11}	X12_ON X12_OFF	x12_ON→ E13	$y0=1 \bullet x12$	x12_ON → E13 (y0)
E14	Regresando (Vuelta)	Apaga a R1 (y0)	S _{H11}	X13_ON X13_OFF	X13_ON→ E14	$y0= 1 \bullet x13$	X13_ON → E14 (y0)

Tabla 4.19 Ecuaciones de estado actuador R1

- Condicionales operativos para el Actuador M1

Los estados y las transiciones del actuador M1 en su ciclo de operación se muestran en Tabla siguiente:

M1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Tipo	Tiempos de ciclo
E21	Detenido (inicio)	Enciende a M1 (y1)	S _c	X1_ON, X1_OFF	x1_ON → E21	Principal	11
E22	Yendo (Ida)	Apaga a M1 (y1)	S _{F21}	X14_ON, X14_OFF	X14_ON → E22	Bandera	+5
E23	Detenido (final de carrera)	Enciende a M1 (y1)	T _{E21}	X15_ON, X15_OFF	X15_ON → E23	Bandera (Temporizador)	0
E24	Regresando (Vuelta)	Apaga a M1 (y1)	S _{H21}	X16_ON, X16_OFF	X16_ON → E24	Bandera (Sensado de Home)	-4

Tabla 4.20 Estados y transiciones actuador M1

Las condiciones de estado y transición para este actuador son las siguientes:

El actuador M1 no se enciende si los sensores SC y S_{H21} no están activos al mismo tiempo.

Esta condición se modela de la manera siguiente:

$$Y1 = x1 \bullet x16$$

Y,

$$X1_ON \text{ and } x16_ON \rightarrow E21 (y1)$$

El actuador M1 se detiene al final de su carrera (S_{F21}):

$$Y1 = 1 \bullet x14$$

$$X14_ON \rightarrow E22 (y1)$$

El actuador M1 espera un segundo por medio de un temporizador (T_{E21}):

$$Y1 = 1 \bullet x15$$

$$X15_ON \rightarrow E23 (y1)$$

El actuador M1 se detiene en Home (S_{H21}):

$$Y0 = 1 \bullet x16$$

$$X16_ON \rightarrow E24 (y1)$$

La siguiente tabla muestra la información de control del actuador M1

M1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Ecuación general	Ecuación de estado
E21	Detenido (inicio)	Enciende a M1 (y1)	S _c	X1_ON, X1_OFF	x1_ON → E21	$y1 = x1 \bullet x16$	X1_ON and x16_ON → E21 (y1)
E22	Yendo (Ida)	Apaga a M1 (y1)	S _{F21}	X14_ON X14_OFF	X14_ON → E22	$y1 = 1 \bullet x14$	X14_ON → E22 (y1)
E23	Detenido (final de carrera)	Enciende a M1 (y1)	T _{E21}	X15_ON X15_OFF	X15_ON → E23	$y1 = 1 \bullet x15$	X15_ON → E23 (y1)
E24	Regresando (Vuelta)	Apaga a M1 (y1)	S _{H21}	X16_ON X16_OFF	X16_ON → E24	$y1 = 1 \bullet x16$	X16_ON → E24 (y1)

Tabla 4.21 Ecuaciones de estado actuador M1

- Condicionales operativos para el Actuador R1

Los estados y las transiciones del actuador R1 en su ciclo de operación se muestran en la Tabla siguiente:

R1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Tipo	Tiempos de ciclo
E31	Detenido (inicio)	Enciende a R1 (y2)	X _{c2}	X2_ON, X2_OFF	X2_ON → E31	Principal	11
E32	Yendo (Ida)	Apaga a R1 (y2)	S _{F31}	X17_ON x17_OFF	X17_ON → E32	Bandera	+5
E33	Detenido (final de carrera)	Enciende a R1 (y2)	T _{E31}	X18_ON X18_OFF	X18_ON → E33	Bandera (Temporizador)	0
E34	Regresando (Vuelta)	Apaga a R1 (y2)	S _{H31}	X19_ON X19_OFF	X19_ON → E34	Bandera (Sensado de Home)	-4

Tabla 4.22 Estados y transiciones actuador R1

Las condiciones de estado y transición para este actuador son las siguientes:

El actuador R1 no se enciende si los sensores X_{c2} y S_{H31} no están activos al mismo tiempo.

Esta condición se modela de la manera siguiente:

$$y2 = x2 \bullet x19$$

Y,

$$X2_ON \text{ and } x19_ON \rightarrow E31 (y2)$$

El actuador R1 se detiene al final de su carrera (S_{F31}):

$$Y2 = 1 \bullet x17$$

$$X17_ON \rightarrow E32 (y2)$$

El actuador R1 espera un segundo por medio de un temporizador (T_{E31}):

$$y2 = 1 \bullet x18$$

$$x18_ON \rightarrow E33 (y2)$$

El actuador R1 se detiene en Home (S_{H31}):

$$Y2 = 1 \bullet x19$$

$$X19_ON \rightarrow E34 (y2)$$

La siguiente Tabla muestra la información de control del actuador R1

R1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Ecuación general	Ecuación de estado
E31	Detenido (inicio)	Enciende a R1 (y2)	X _{c2}	X2_ON, X2_OFF	X2_ON→ E31	$y2=x2 \bullet x19$	X2_ON and x19_ON → E31 (y2)
E32	Yendo (Ida)	Apaga a R1 (y2)	S _{F31}	X17_ON x17_OFF	X17_ON→ E32	$y2=1 \bullet x17$	X17_ON → E32 (y2)
E33	Detenido (final de carrera)	Enciende a R1 (y2)	T _{E31}	X18_ON X18_OFF	X18_ON→ E33	$y2=1 \bullet x18$	X18_ON → E33 (y2)
E34	Regresando (Vuelta)	Apaga a R1 (y2)	S _{H31}	X19_ON X19_OFF	X19_ON→ E34	$y2= 1 \bullet x19$	X19_ON → E34 (y2)

Tabla 4.23 Ecuaciones de estado actuador R1

Al terminar la última máquina del módulo 1 se concreta el control condicional robusto para el módulo 1. Por lo que se prosigue con el módulo 1.

- Ecuaciones de estado para sensado robusto del módulo 2

En esta sección se presenta el diseño de las ecuaciones de estado para el sensado robusto de las máquinas que componen el módulo 2.

- Condicionales operativos para el Actuador R1

Se puede representar los estados y las transiciones del actuador R1 en un ciclo de operación de acuerdo con la tabla siguiente:

R1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Tipo	Tiempos de ciclo
E41	Detenido (inicio)	Enciende a R1 (y3)	S _d	X3_ON, X3_OFF	X3_ON→ E41	Principal	11
E42	Yendo (Ida)	Apaga a R1 (y3)	S _{F41}	X21_ON X21_OFF	X21_ON→ E42	Bandera	+5
E43	Detenido (final de carrera)	Enciende a R1 (y3)	T _{E41}	X22_ON X22_OFF	X22_ON→ E43	Bandera (Temporizador)	0
E44	Regresando (Vuelta)	Apaga a R1 (y3)	S _{H41}	X23_ON X23_OFF	X23_ON→ E44	Bandera (Sensado de Home)	-4

Tabla 4.24 Estados y transiciones actuador R1

Para el caso de las ecuaciones de estado del actuador R1, se requieren los siguientes condicionantes:

El actuador R1 no se enciende si los sensores S_d y S_{H41} no están activos al mismo tiempo.

Esta condición se modela de la manera siguiente:

$$y3 = x3 \bullet x23$$

$$x3_ON \text{ and } x23_ON \rightarrow E41 (y3)$$

El actuador R1 se detiene al final de su carrera (S_{F41}):

$$y3 = 1 \bullet x21$$

$$x21_ON \rightarrow E42 (y3)$$

El actuador R1 espera un segundo por medio de un temporizador (T_{E41}):

$$y3 = 1 \bullet x22$$

$$x22_ON \rightarrow E43 (y3)$$

El actuador R1 se detiene en Home (S_{H41}):

$$y2 = 1 \bullet x23$$

$$x23_ON \rightarrow E44 (y3)$$

La siguiente tabla muestra la información de control del actuador R1.

R1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Ecuación general	Ecuación de estado
E41	Detenido (inicio)	Enciende a R1 (y3)	S_d	X3_ON, X3_OFF	X3_ON → E41	$y3 = x3 \bullet x23$	X3_ON and x23_ON → E41 (y3)
E42	Yendo (Ida)	Apaga a R1 (y3)	S_{F41}	X21_ON X21_OFF	X21_ON → E42	$y3 = 1 \bullet x21$	x21_ON → E42 (y3)
E43	Detenido (final de carrera)	Enciende a R1 (y3)	T_{E41}	X22_ON X22_OFF	X22_ON → E43	$y3 = 1 \bullet x22$	x22_ON → E43 (y3)

E44	Regresando (Vuelta)	Apaga a R1 (y3)	S _{H41}	X23_ON X23_OFF	X23_ON → E44	y3= 1•x23	x23_ON → E44 (y3)
-----	---------------------	-----------------	------------------	-------------------	--------------	-----------	-------------------

Tabla 4.25 Ecuaciones de estado actuador R1

- Condicionales operativos para el Actuador M2

Los estados y las transiciones del actuador M2 en su ciclo de operación se muestran en la Tabla siguiente:

M2							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Tipo	Tiempos de ciclo
E51	Detenido (inicio)	Enciende a M2 (y4)	S _e	X4_ON, X4_OFF	X4_ON → E51	Principal	16
E52	Yendo (Ida)	Apaga a M2 (y4)	S _{F51}	X24_ON X24_OFF	X24_ON → E52	Bandera	+3
E53	Detenido (final de carrera)	Enciende a M2 (y4)	T _{E51}	X25_ON X25_OFF	X25_ON → E53	Bandera (Temporizador)	0
E54	Regresando (Vuelta)	Apaga a M2 (y4)	S _{H51}	X26_ON X26_OFF	X26_ON → E54	Bandera (Sensado de Home)	-1

Tabla 4.26 Estados y transiciones actuador M2

Las condiciones de estado y transición para esta máquina son las siguientes:

El actuador M2 no se enciende si los sensores S_e y S_{H51} no están activos al mismo tiempo.

Esta condición se modela de la manera siguiente:

$$y4 = x4 \bullet x26$$

Y,

$$X4_ON \text{ and } x26_ON \rightarrow E51 (y4)$$

La máquina M2 se detiene al fin de su carrera (S_{F51}):

$$y4 = 1 \bullet x14$$

$$x24_ON \rightarrow E52 (y4)$$

La máquina M2 espera un segundo por medio de un temporizador (T_{E51}):

$$y4=1 \bullet x25$$

$$x25_ON \rightarrow E53 (y4)$$

El actuador M2 se detiene en Home (S_{H51}):

$$y4= 1 \bullet x26$$

$$x26_ON \rightarrow E54 (y4)$$

La Tabla 48 muestra la información de control de la máquina M2.

M2							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Ecuación general	Ecuación de estado
E51	Detenido (inicio)	Enciende a M2 (y4)	Se	X4_ON, X4_OFF	X4_ON → E51	$y4=x4 \bullet x26$	X4_ON and x26_ON → E51 (y4)
E52	Yendo (Ida)	Apaga a M2 (y4)	S _{F51}	X24_ON X24_OFF	X24_ON → E52	$y4=1 \bullet x24$	X24_ON → E52 (y4)
E53	Detenido (final de carrera)	Enciende a M2 (y4)	T _{E51}	X25_ON X25_OFF	X25_ON → E53	$y4=1 \bullet x25$	X25_ON → E53 (y4)
E54	Regresando (Vuelta)	Apaga a M2 (y4)	S _{H51}	X26_ON X26_OFF	X26_ON → E54	$y4= 1 \bullet x26$	X26_ON → E54 (y4)

Tabla 4.27 Ecuaciones de estado actuador M2

- Condicionales operativos para el Actuador R1

Los estados y las transiciones del actuador R1 en su ciclo de operación se muestran en la Tabla siguiente:

R1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Tipo	Tiempos de ciclo
E61	Detenido (inicio)	Enciende a R1 (y5)	X _e	X5_ON, X5_OFF	X5_ON → E61	Principal	13
E62	Yendo (Ida)	Apaga a R1 (y5)	S _{F61}	X27_ON X27_OFF	X27_ON → E62	Bandera	+4

E63	Detenido (final de carrera)	Enciende a R1 (y5)	T_{E61}	X28_ON X28_OFF	X28_ON → E63	Bandera (Temporizador)	0
E64	Regresando (Vuelta)	Apaga a R1 (y5)	S_{H61}	X29_ON X29_OFF	X29_ON → E64	Bandera (Sensado de Home)	-3

Tabla 4.28 Estados y transiciones actuador R1

Para el caso de las ecuaciones de estado del actuador R1, se requieren los siguientes condicionantes:

El actuador R1 no se enciende si los sensores X_e y S_{H61} no están activos al mismo tiempo.

Esta condición se modela de la manera siguiente:

$$y5 = x5 \bullet x29$$

$$x5_ON \text{ and } x29_ON \rightarrow E61 (y5)$$

El actuador R1 se detiene al final de su carrera (S_{F61}):

$$y5 = 1 \bullet x27$$

$$x27_ON \rightarrow E62 (y5)$$

El actuador R1 espera un segundo por medio de un temporizador (T_{E61}):

$$y5 = 1 \bullet x28$$

$$x28_ON \rightarrow E63 (y5)$$

El actuador R1 se detiene en Home (S_{H61}):

$$y5 = 1 \bullet x29$$

$$x29_ON \rightarrow E64 (y5)$$

La siguiente tabla se muestra la información de control del actuador R1.

R1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Ecuación general	Ecuación de estado
E61	Detenido (inicio)	Enciende a R1 (y5)	X_e	X5_ON, X5_OFF	X5_ON → E61	$y5 = x5 \bullet x29$	$x5_ON \text{ and } x29_ON \rightarrow E61 (y5)$

E62	Yendo (Ida)	Apaga a R1 (y5)	S_{F61}	X27_ON X27_OFF	X27_ON → E62	$y5=1 \bullet x27$	X27_ON → E62 (y5)
E63	Detenido (final de carrera)	Enciende a R1 (y5)	T_{E61}	X28_ON X28_OFF	X28_ON → E63	$y5=1 \bullet x28$	X28_ON → E63 (y5)
E64	Regresando (Vuelta)	Apaga a R1 (y5)	S_{H61}	X29_ON X29_OFF	X29_ON → E64	$y5=1 \bullet x29$	X29_ON → E64 (y5)

Tabla 4.29 Ecuaciones de estado actuador R1

- Condicionales operativos para el Actuador R2

Los estados y las transiciones del actuador R2 en su ciclo de operación se muestran en la Tabla siguiente:

R2							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Tipo	Tiempos de ciclo
E71	Detenido (inicio)	Enciende a R2 (y6)	S_f	X6_ON, X6_OFF	X6_ON → E71	Principal	13
E72	Yendo (Ida)	Apaga a R2 (y6)	S_{F71}	X30_ON x30_OFF	x30_ON → E72	Bandera	+4
E73	Detenido (final de carrera)	Enciende a R2 (y6)	T_{E71}	x31_ON x31_OFF	x31_ON → E73	Bandera (Temporizador)	0
E74	Regresando (Vuelta)	Apaga a R2 (y6)	S_{H71}	x32_ON x32_OFF	x32_ON → E74	Bandera (Sensado de Home)	-3

Tabla 4.30 Estados y transiciones actuador R2

Para el caso de las ecuaciones de estado del actuador R2, se requieren los siguientes condicionantes:

El actuador R2 no se enciende si los sensores S_f y S_{H71} no están activos al mismo tiempo.

Esta condición se modela de la manera siguiente:

$$y6 = x6 \bullet x32$$

$$x6_ON \text{ and } x32_ON \rightarrow E71 (y6)$$

El actuador R2 se detiene al final de su carrera (S_{F71}):

$$y6=1 \bullet x30$$

$$x30_ON \rightarrow E72 (y6)$$

El actuador R2 espera un segundo por medio de un temporizador (T_{E71}):

$$y6=1 \bullet x31$$

$$x31_ON \rightarrow E73 (y6)$$

El actuador R2 se detiene en Home (S_{H71}):

$$y6= 1 \bullet x32$$

$$x32_ON \rightarrow E74 (y6)$$

La siguiente tabla muestra la información de control del actuador R2.

R2							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Ecuación general	Ecuación de estado
E71	Detenido (inicio)	Enciende a R2 (y6)	S _f	X6_ON, X6_OFF	X6_ON → E71	$y6=x6 \bullet x32$	x6_ON and x32_ON → E71 (y6)
E72	Yendo (Ida)	Apaga a R2 (y6)	S _{F71}	X30_ON x30_OFF	x30_ON → E72	$y6=1 \bullet x30$	x30_ON → E72 (y6)
E73	Detenido (final de carrera)	Enciende a R2 (y6)	T _{E71}	x31_ON x31_OFF	x31_ON → E73	$y6=1 \bullet x31$	x31_ON → E72 (y6)
E74	Regresando (Vuelta)	Apaga a R2 (y6)	S _{H71}	x32_ON x32_OFF	x32_ON → E74	$y6= 1 \bullet x32$	x32_ON → E72 (y6)

Tabla 4.31 Ecuaciones de estado actuador R2

- Condicionales operativos para el Actuador B1

Los estados y las transiciones del actuador B1 en su ciclo de operación se muestran en la Tabla siguiente:

B1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Tipo	Tiempos de ciclo
E81	Detenido (inicio)	Enciende a B1 (y7)	x _f	X7_ON, X7_OFF	X7_ON → E71	Principal	13
E82	Yendo (Ida)	Apaga a B1 (y7)	S _{F81}	X33_ON x33_OFF	x33_ON → E72	Bandera	+4

Tabla 4.32 Estados y transiciones actuador B1

Para el caso de las ecuaciones de estado de la máquina B1, se requieren los siguientes condicionantes:

La máquina B1 no se enciende si X_f no está encendido.

Esta condición se modela de la manera siguiente:

$$y7=1 \bullet x7$$

$$x7_ON \rightarrow E81 (y7)$$

La máquina B1 se detiene por la acción de S_{F81}:

$$y7=1 \bullet x33$$

$$x33_ON \rightarrow E82 (y7)$$

La siguiente tabla muestra la información de control de la máquina B1.

B1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Ecuación general	Ecuación de estado
E81	Detenido (inicio)	Enciende a B1 (y7)	x _f	X7_ON, X7_OFF	X7_ON → E71	y7=1•x7	x7_ON → E81 (y7)
E82	Yendo (Ida)	Apaga a B1 (y7)	S _{F81}	X33_ON x33_OFF	x33_ON → E72	y7=1•x33	x33_ON → E82 (y7)

Tabla 4.33 Ecuaciones de estado actuador B1

- Condicionales operativos para el Actuador R3

Los estados y las transiciones del actuador R3 en su ciclo de operación se muestran en la Tabla siguiente:

R3							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Tipo	Tiempos de ciclo
E91	Detenido (inicio)	Enciende a R3 (y8)	S _g	X8_ON, X8_OFF	X8_ON → E71	Principal	13
E92	Yendo (Ida)	Apaga a R3 (y8)	S _h	X34_ON, X34_OFF	x34_ON → E72	Bandera	+4
E93	Detenido (final de carrera)	Enciende a R3 (y8)	T _{E91}	x35_ON, x35_OFF	x35_ON → E73	Bandera (Temporizador)	0
E94	Regresando (Vuelta)	Apaga a R3 (y8)	S _{H91}	x36_ON, x36_OFF	x36_ON → E74	Bandera (Sensado de Home)	-3

Tabla 4.34 Estados y transiciones actuador R3

Para el caso de las ecuaciones de estado del actuador R3, se requieren los siguientes condicionantes:

El actuador R3 no se enciende si los sensores S_g y S_{H91} no están activos al mismo tiempo.

Esta condición se modela de la manera siguiente:

$$y8 = x8 \bullet x36$$

$$x8_ON \text{ and } x36_ON \rightarrow E91 \text{ (y8)}$$

El actuador R3 se detiene al final de su carrera (S_h):

$$y8 = 1 \bullet x34$$

$$x34_ON \rightarrow E92 \text{ (y8)}$$

El actuador R3 espera un segundo por medio de un temporizador (T_{E91}):

$$y8 = 1 \bullet x35$$

$$x35_ON \rightarrow E93 \text{ (y8)}$$

El actuador R3 se detiene en Home (S_{H91}):

$$y8 = 1 \bullet x36$$

$$x36_ON \rightarrow E94 \text{ (y8)}$$

La siguiente tabla muestra la información de control del actuador R3.

R3							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Ecuación general	Ecuación de estado
E91	Detenido (inicio)	Enciende a R3 (y8)	S _g	X8_ON, X8_OFF	X8_ON → E71	$y8 = x8 \bullet x36$	x8_ON and x36_ON → E91 (y8)
E92	Yendo (Ida)	Apaga a R3 (y8)	S _h	X34_ON, x34_OFF	x34_ON → E72	$y8 = 1 \bullet x34$	x34_ON → E92 (y8)
E93	Detenido (final de carrera)	Enciende a R3 (y8)	T _{E91}	x35_ON, x35_OFF	x35_ON → E73	$y8 = 1 \bullet x35$	x35_ON → E93 (y8)
E94	Regresando (Vuelta)	Apaga a R3 (y8)	S _{H91}	x36_ON, x36_OFF	x36_ON → E74	$y8 = 1 \bullet x36$	x36_ON → E94 (y8)

Tabla 4.35 Ecuaciones de estado actuador R3

- Sensado bandera robusto en el diseño de las ecuaciones de estado

La siguiente tabla muestra la inserción del sensado bandera robusto dentro de las tablas de control

Diagrama escalera								
Lineas de control	Ciclo de arranque	Ciclo automatico	Ensamble 1	Sensado bandera robusto	Sensado bandera condicional	Sensado de emergencia	Ensamble 2 o modelo final	Comentarios finales
lc0	Y0=1*X0	Y0=1*X0	Y0=1*X0	y0=x0*x13 y0=1*x11 y0=1*x12 y0=1*x13				
lc1	Y1=1*X1		Y1=1*X1	y1=x1*x16 y1=1*x14 y1=1*x15 y1=1*x16				
lc2	Y2=1*X2		Y2=1*X2	y2=x2*x19 y2=1*x17 y2=1*x18 y2=1*x19				
lc3	Y3=1*X3	Y3=1*X3*X0', Y0'=1*X0'*X3	Y3=1*X3*X0', Y0'=1*X0'*X3	y3=x3*x23 y3=1*x21 y3=1*x22 y3=1*x23				
lc4	Y4=1*X4		Y4=1*X4	y4=x4*x26 y4=1*x24 y4=1*x25 y4=1*x26				
lc5	Y5=1*X5		Y5=1*X5	y5=x5*x29 y5=1*x27 y5=1*x28 y5=1*x29				
lc6	Y6=1*X6		Y6=1*X6	y6=x6*x32 y6=1*x30 y6=1*x31 y6=1*x32				
lc7	Y7=1*X7		Y7=1*X7	y7=x7*x33 y7=1*x33				
lc8	Y8=1*X8		Y8=1*X8	y8=x8*x36 y8=1*x34 y8=1*x35 y8=1*x36				
lc9		Y3'=1*X3'*X0''*X9, Y0''=1*X0''*X3'*X9	Y3'=1*X3'*X0''*X9, Y0''=1*X0''*X3'*X9					

Tabla 4.36 Inserción del sensado bandera robusto

- Ecuaciones de estado para el sensado bandera condicional

Como es bien sabido, el sensado bandera condicional se coloca cuando son necesarias condiciones extras, por ejemplo: botones de encendido o seguridad de que una máquina llegó a home. Para el caso de estudio de este trabajo se propondrá la siguiente:

El inicio del todo el sistema se podrá realizar pulsando un botón (B1), cuando exista pieza en la posición (S1) de inicio y el robot esté en home (S_{H11}).

La ecuación de estado general es:

$$Y0 = x0 \bullet (x13 \bullet x10)$$

$$X0_ON \text{ and } (x13_ON \text{ and } x10_ON) \rightarrow E11 (y0)$$

Aquí, x10 es la señal asociada con el botón B1. La tabla de ecuaciones de estado para el actuador R1 es la siguiente:

R1							
Estado	Descripción	Acciones	Sensor	Transiciones	Estado/destino	Ecuación general	Ecuación de estado
E11	Detenido (inicio)	Enciende a R1 (y0)	S ₀	X0_ON, X0_OFF X10_ON, X10_OFF	X0_ON → E11 X10_ON → E11	$y0 = x0 \bullet (x13 \bullet x10)$	X0_ON and (x13_ON and x10_ON) → E11 (y0)

- Ecuaciones de estado para el sensado de paro de emergencia

Para completar el control, es necesario incorporar un paro de emergencia. Este proceso se logra al colocar un sensor general a todo el sistema. Este sensor se llamará S_{PM} cuya señal genérica será x20. De manera que al ser paro de emergencia global esté debe ser puesto en cada ecuación de estado. Por ejemplo para el caso de la línea de control 1 y al inicio del sistema se tiene.

$$Y0 = x0 \bullet (x13 \bullet x10) \bullet (-x20)$$

La siguiente tabla muestra todas las ecuaciones de estado generales:

Diagrama escalera								
Lineas de control	Ciclo de arranque	Ciclo automatico	Ensamble 1	Sensado bandera robusto	Sensado bandera condicional	Sensado de emergencia	Ensamble 2 o modelo final	Comentarios finales
lc0	$Y0=1 \cdot X0$	$Y0=1 \cdot X0$	$Y0=1 \cdot X0$	$y0=x0 \cdot x13$ $y0=1 \cdot x11$ $y0=1 \cdot x12$ $y0=1 \cdot x13$	$Y0=x0 \cdot (x13 \cdot x10)$	$Y0=x0 \cdot (x13 \cdot x10) \cdot (-x20)$	$Y0=x0 \cdot (x13 \cdot x10) \cdot (-x20)$ $y0=1 \cdot x11 \cdot (-x20)$ $y0=1 \cdot x12 \cdot (-x20)$ $y0=1 \cdot x13 \cdot (-x20)$	
lc1	$Y1=1 \cdot X1$		$Y1=1 \cdot X1$	$y1=x1 \cdot x16$ $y1=1 \cdot x14$ $y1=1 \cdot x15$ $y1=1 \cdot x16$			$y1=x1 \cdot x16 \cdot (-x20)$ $y1=1 \cdot x14 \cdot (-x20)$ $y1=1 \cdot x15 \cdot (-x20)$ $y1=1 \cdot x16 \cdot (-x20)$	
lc2	$Y2=1 \cdot X2$		$Y2=1 \cdot X2$	$y2=x2 \cdot x19$ $y2=1 \cdot x17$ $y2=1 \cdot x18$ $y2=1 \cdot x19$			$y2=x2 \cdot x19 \cdot (-x20)$ $y2=1 \cdot x17 \cdot (-x20)$ $y2=1 \cdot x18 \cdot (-x20)$ $y2=1 \cdot x19 \cdot (-x20)$	
lc3	$Y3=1 \cdot X3$	$Y3=1 \cdot X3 \cdot X0'$, $Y0'=1 \cdot X0' \cdot X3$	$Y3=1 \cdot X3 \cdot X0'$, $Y0'=1 \cdot X0' \cdot X3$	$y3=x3 \cdot x23$ $y3=1 \cdot x21$ $y3=1 \cdot x22$ $y3=1 \cdot x23$			$Y3=1 \cdot X3 \cdot X0' \cdot x23 \cdot (X20)$, $Y0'=1 \cdot X0' \cdot X3 \cdot (X20)$	
lc4	$Y4=1 \cdot X4$		$Y4=1 \cdot X4$	$y4=x4 \cdot x26$ $y4=1 \cdot x24$ $y4=1 \cdot x25$ $y4=1 \cdot x26$			$y4=x4 \cdot x26 \cdot (X20)$ $y4=1 \cdot x24 \cdot (X20)$ $y4=1 \cdot x25 \cdot (X20)$ $y4=1 \cdot x26 \cdot (X20)$	
lc5	$Y5=1 \cdot X5$		$Y5=1 \cdot X5$	$y5=x5 \cdot x29$ $y5=1 \cdot x27$ $y5=1 \cdot x28$ $y5=1 \cdot x29$			$y5=x5 \cdot x29 \cdot (X20)$ $y5=1 \cdot x27 \cdot (X20)$ $y5=1 \cdot x28 \cdot (X20)$ $y5=1 \cdot x29 \cdot (X20)$	
lc6	$Y6=1 \cdot X6$		$Y6=1 \cdot X6$	$y6=x6 \cdot x32$ $y6=1 \cdot x30$ $y6=1 \cdot x31$ $y6=1 \cdot x32$			$y6=x6 \cdot x32 \cdot (X20)$ $y6=1 \cdot x30 \cdot (X20)$ $y6=1 \cdot x31 \cdot (X20)$ $y6=1 \cdot x32 \cdot (X20)$	
lc7	$Y7=1 \cdot X7$		$Y7=1 \cdot X7$	$y7=x7 \cdot x33$ $y7=1 \cdot x33$			$y7=x7 \cdot x33 \cdot (X20)$ $y7=1 \cdot x33 \cdot (X20)$	
lc8	$Y8=1 \cdot X8$		$Y8=1 \cdot X8$	$y8=x8 \cdot x36$ $y8=1 \cdot x34$ $y8=1 \cdot x35$ $y8=1 \cdot x36$			$y8=x8 \cdot x36 \cdot (X20)$ $y8=1 \cdot x34 \cdot (X20)$ $y8=1 \cdot x35 \cdot (X20)$ $y8=1 \cdot x36 \cdot (X20)$	
lc9		$Y3'=1 \cdot X3' \cdot X0'' \cdot X9$, $Y0''=1 \cdot X0'' \cdot X3' \cdot X9$	$Y3'=1 \cdot X3' \cdot X0'' \cdot X9$, $Y0''=1 \cdot X0'' \cdot X3' \cdot X9$				$Y3'=1 \cdot X3' \cdot X0'' \cdot X9 \cdot (X20)$, $Y0''=1 \cdot X0'' \cdot X3' \cdot X9 \cdot (X20)$	

Tabla 4.37 Ecuaciones de estado generales

4.3 Simulación del control

Al haber obtenido las ecuaciones de estado generales se procedió hacer la simulación aplicando el modelo de Grafset para simular la secuencia tomando en cuenta la ida y vuelta. Como se puede ver en la siguiente imagen se representaron todas las maquinas que componen la celda con pistones, dividiéndose por módulos.

Modulo 1

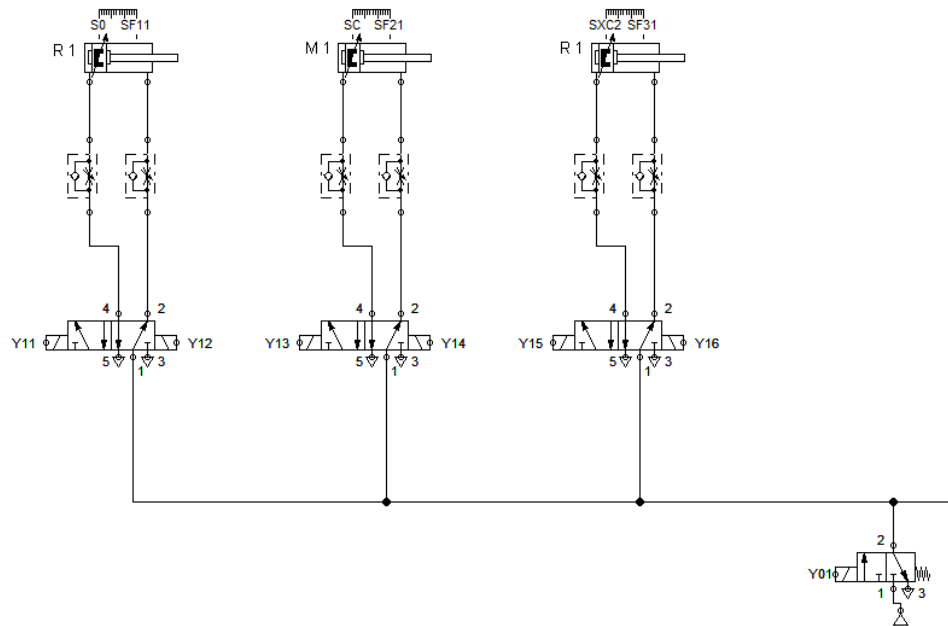


Figura 4.7 Módulo 1 en FluidSim

Modulo 2

por cuestiones de software

XC2 = SXC2

XE = SXE

XF= SXF

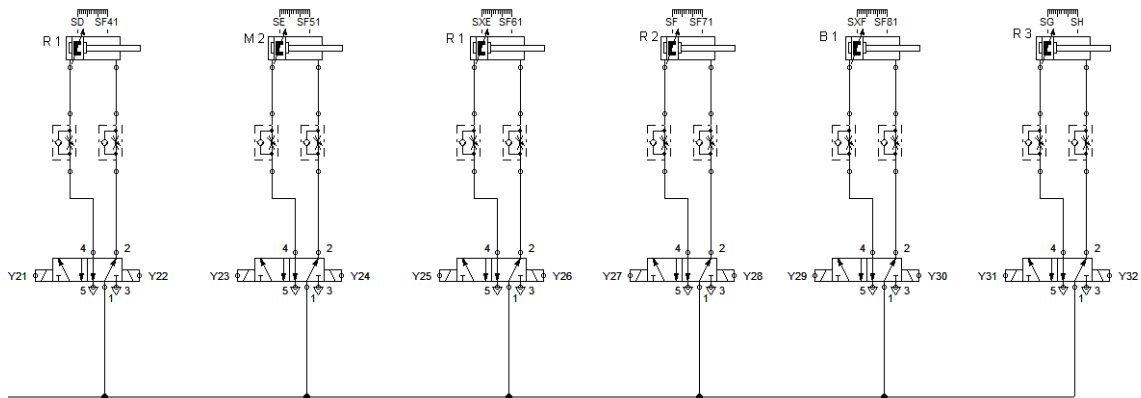


Figura 4.8 Módulo 2 en FluidSim

Lo siguiente fue colar las entradas y salidas de nuestro sistema para poder efectuar el código grafcet. Se utilizaron varios bloques de este ya que las salidas eran más de las que se podían conectar en un solo bloque.

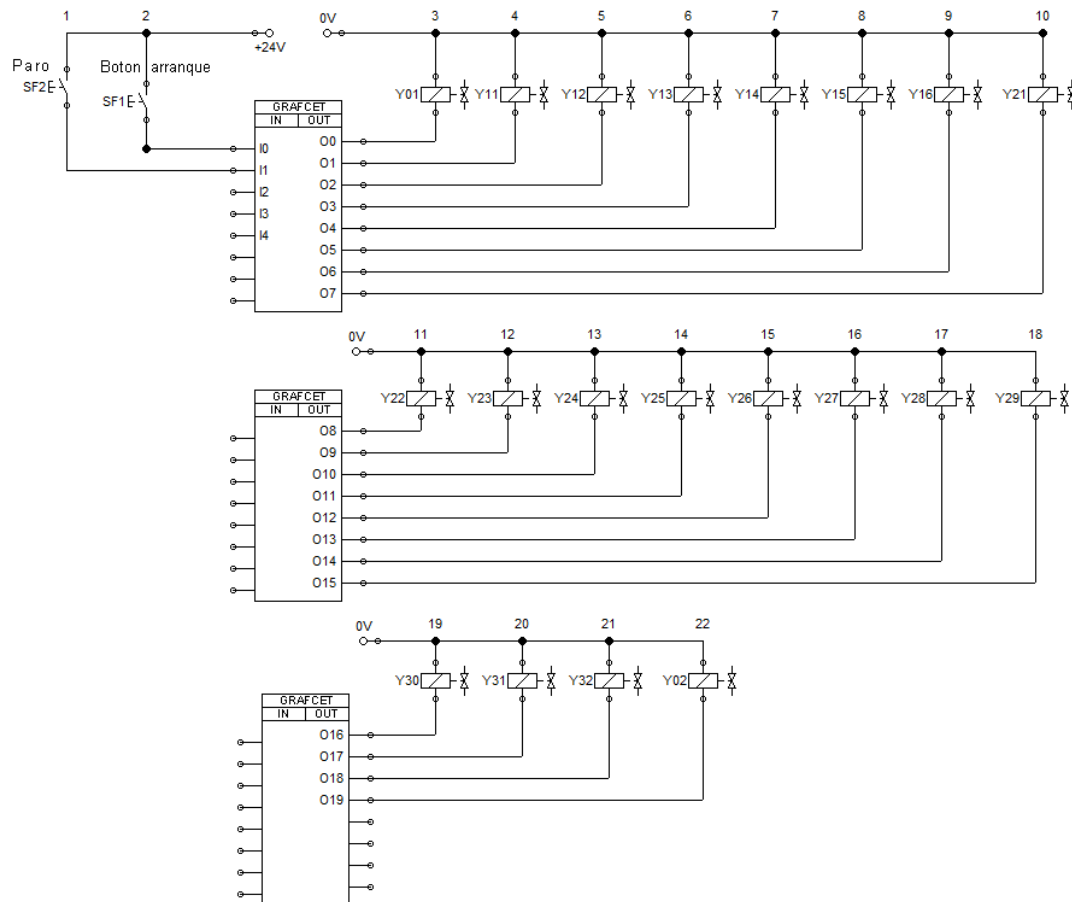


Figura 4.9 Entradas y salidas del Grafcet

Lo siguiente fue la programación de este. Teniendo un sistema para el botón de arranque y paro en un bloque por separado. La primera fila representa al módulo 1, en el cual se representaron las ecuaciones de estado generadas en este trabajo, como se puede apreciar las condiciones son las mismas que se han estado desarrollando y activan a su respectiva máquina. Siguiendo esta secuencia hasta terminar con los dos módulos.

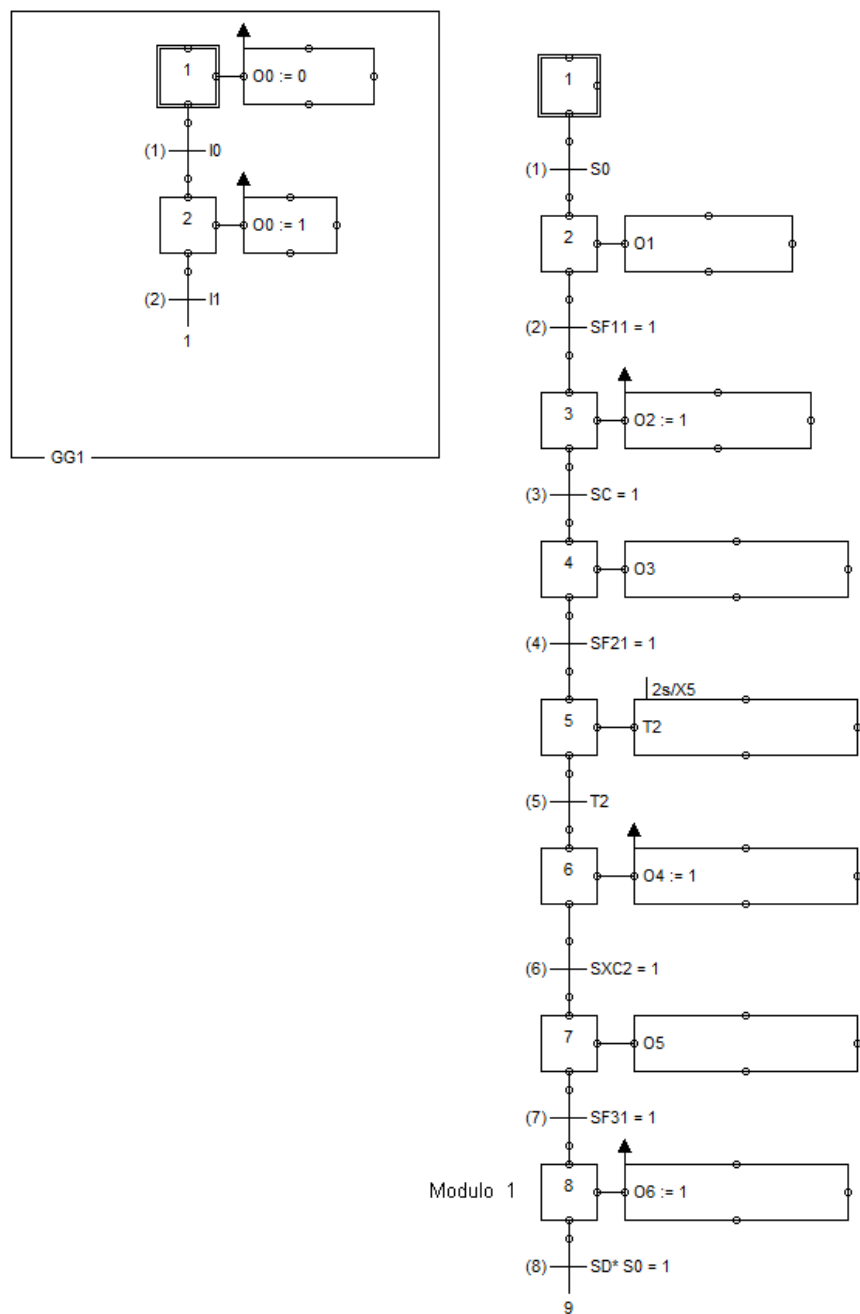
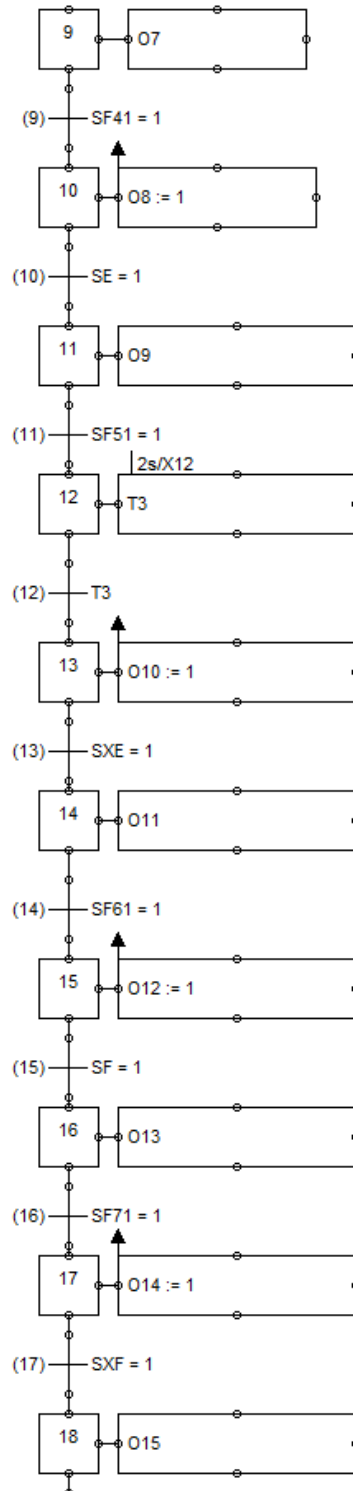


Figura 4.10 Grafcet del módulo 1



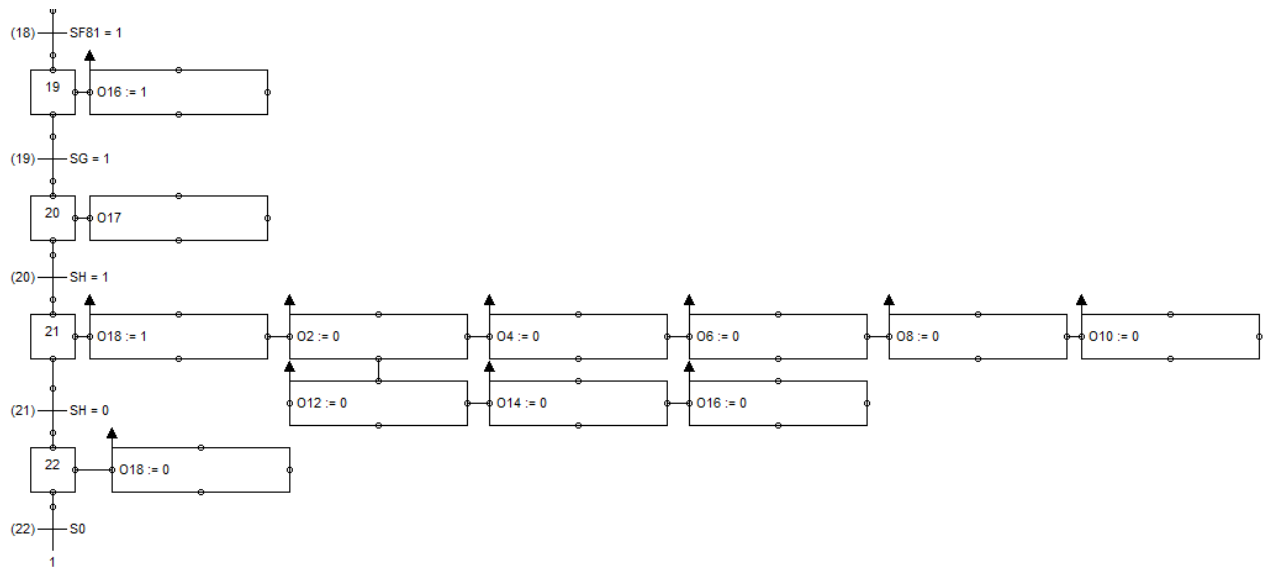


Figura 4.11 Grafcet del módulo 2

Efectuando la simulación y siguiendo la secuencia previamente descrita en la crónica de proceso. Comprobando el funcionamiento de las ecuaciones de estado, ya que como se mencionó anteriormente este Grafcet sigue la secuencia de estas ecuaciones, tomando en cuenta las condiciones para que cada máquina cambie de estado.

CAPÍTULO V - CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se mejoró una metodología para sistematizar y automatizar las mediciones de una pieza de trabajo y la distribución de planta de la línea de producción didáctica iCIM 3000 localizada en las instalaciones de la Universidad La Salle Noroeste. Dicha metodología se asocia a la metodología de la sincronización y control desarrollada por Jiménez et al (2003). Las principales conclusiones que se derivan del presente trabajo se resumen en los puntos siguientes:

- 1) Este trabajo de tesis muestra toda una metodología robusta que se puede aplicar para estudiar todo un proceso desde la medición sistemática de los partes y componentes hasta la sincronización y control del proceso. La fase de la metodología que se mejoró fue la Fase 3, particularmente la parte de la automatización robusta (sensado de vuelta) y el uso del Grafcet.
- 2) Una metodología captura todos los pasos del proceso de la sincronización y automatización de un sistema, creando un acceso fácil y rápido a cada elemento de este, haciendo que se reduzcan tiempos en la parte del diseño y comprobación de estos.
- 3) Las ecuaciones de estado generadas por la metodología fueron simuladas aplicando el modelo de Grafcet.
- 4) La herramienta Fluid Sim fuera útil para simular el control de la celda de manufactura estudiada.

Con el desarrollo de este trabajo serán posibles investigaciones como las siguientes:

- 1) Diseño de un tablero para la sincronización.
- 2) Pruebas en celdas de manufactura reales.
- 3) Estudios de control en sistemas productivos no secuenciales.

Referencias

- [1] Ružarovský R., Delgado D.R., Holubek R. and Košťál P. *Automated inprocess inspection method in the Flexible production system iCIM 3000. Applied Mechanics and Materials Vol. 693*, 2014, pp 50-55
- [2] Groover, M.P. Automation. Encyclopædia Britannica. Encyclopædia Britannica, inc. Accessed online on 26 January 2019, at. <https://www.britannica.com/technology/automation>, 2018.
- [3] Praveen R.K, Nirmalraja T.R., Goutham H, Sabarinathan R. and Logeesan A. *Industrial Automation System, Advance in Electronic and Electric Engineering*. Volume 3, Number 6, 2013, pp. 717-726.
- [4] López M.L. Lovato, S. G. y Abad G. *El impacto de la cuarta revolución industrial en las relaciones sociales y productivas de la industria del plástico IMPLASTIC S. A. en Guayaquil-Ecuador: retos y perspectivas*. Universidad y Sociedad [online]. 2018, vol.10, n.5, pp.153-160
- [5] Wander J.B. *CIM: principles of Computer Integrate Manufacturing*. John Wiley & Sons, 1992.
- [6] Elanchezhian, C., Sunder, T., & Shanmuga, G. *Computer Aided Manufacturing*. New Delhi: Laxmi Publications. 2007
- [7] Hernández G. y Medel J. *Tiempo real en los sistemas de manufactura flexible automatizado, Computación y Sistemas Vol. 15*, No. 1, 2011, pp 129-132
- [8] Grove M. *Automation, Production System and Computer Integrated Manufacturing*, E.E.U.U, New Jersey: Prentice Hall Press Upper Saddle River, 2002.
- [9] Rodríguez A. *Sistemas SCADA*, Tercera Edición, Alfaomega. 2013.
- [10] Pérez E. *Los sistemas SCADA en la automatización industrial. Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 4. 2015, Pp. 3-14.
- [11] Law A.M., and Keaton W. D. *Simulation Modelling and Analysis*, 2nd ed.: McGraw-Hill Higher Education. 1997.
- [12] Uzam, M y Jones H. *Discrete event control systems design using Automation Petri Nets and their ladder diagram implementation*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 14, No. 10, 1998, pp 716-728.
- [13] Murillo, L.D. *Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables Tecnología en Marcha*, Vol. 21, N.º 4, 2008, pp. 102-125

- [14] Castellanos J.S. y Solaque L.E. *Modelado con redes de petri e implementación con grafcet de un sistema de manufactura flexible con procesos concurrentes y recursos compartidos*, Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 20-1, 2010, pp. 61-75.
- [15] Sanchez, I., Matell, F. *Automatización multinivel de celda de manufactura robotizada utilizando máquinas de estados finitos*. Tecnológico de Monterrey, Campus Aguascalientes, México. 2019.
- [16] Ramadge, P.J. & Wonham, W.M. *Supervisory control of a class of discrete event processes*. SIAM J. Control and Optimization, 25(1), 1987, pp. 206-230.
- [17] Balcells, J y Romeral, J. *Autómatas Programables*, Primera edición, Maracombo. 1997.
- [18] Wright, J. *The Debate Over Which PLC Programming Language is the State of the Art*, Journal of Industrial Technology, vol. 15, núm. 4. 1999, pp. 1-5.
- [19] Carrillo S. J., Polo A. y Esmeral M. *Diseño y construcción de un controlador lógico programable basado en un núcleo reconfigurable*, Tecnura, vol. 9, núm. 17, 2005, pp. 55-64
- [20] Goldratt, E. y Fox R. *La Carrera: en busca de las Ventajas Competitivas*. 2ª edición en español. Ediciones Castillo. México. 2002.
- [21] Chase, R., Aquilano, N. y Jacobs, R. *Synchronous Manufacturing*. Tenth Edition, 2003, pp 673- 700.
- [22] Chankov, S., Thorsten, M. and Bendul, J. *Synchronization in manufacturing systems: quantification and relation to logistics performance*. International Journal Of Production Research, Vol. 54 , Iss. 20. 2016, pp. 6033-6051.
- [23] Jiménez E., Martínez F., Martínez V., Pérez S., Ochoa J., Reyes L., Madrid A. *Application of the Software Fluid - Sim to Simulate the Synchronization of Productive Systems Serials: The Case of the Test of the Automatic Cycle*. ICECE 2010. Brasil.
- [24] [25] Jiménez E., Reyes L., Galindo F., García D., González I., Hito O., Mercado I. "Sincronización local y global de sistemas productivos seriales". Informe interno de investigación. 2003. Universidad la Salle Noroeste.
- [26] Vallejo, B. *Aspectos generales de la automatización industrial del sector farmacéutico*. Universidad Nacional de Colombia. 2006, pp. 47
- [27] Exsol. *¿Qué es la automatización industrial?*. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. 2007.
- [28] Torres I.C., Huerta P.F y Ismael Bautista Z.I. *Actualización del PLC de un Sistema de Manufactura Integrada por Computador*, RISTI, Revista Ibérica de Sistemas y Tecnologías de la Información, 2018, No. 27, pp. 18-35
- [29] Necoechea, A., Pozos, O., Sandoval, P., Rivera, A. *Diseño de una celda de manufactura*. Ciudad de México, México. 2018.

- [30] Chacón, M. *Metodología para la evaluación de la flexibilidad en celdas de manufactura*. Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey. 2003.
- [31] Tsourveloudis, C., Yannis A. *Manufacturing Flexibility Measurement: A Fuzzy Logic Framework*. IEEE Transactions on Robotics and Automation. Volumen 14. No. 4. 1998.
- [32] Gupta, P., Goyal, S. *Flexibility of Manufacturing Systems: Concepts and Measurements*. European Journal of Operational Research. Volumen 43, 1989, pp. 119-135.
- [33] Shewchuk, P., Colin, L. *Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures*. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems. Volumen 10. 1998, pp. 325-349.
- [34] Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. *Synchronization. A universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge University Press. ISBN 0521592852. 2001.
- [35] García, A., Castillo, F. *CIM: El computador en la automatización de la producción*. Universidad de Castilla, La Mancha, Cuenca. 2007.
- [36] Velásquez, J. *Computer integrated manufacturing CIM*. (Noviembre 12). [Online]. Available: 2021. http://www.jvelasquezc.com/CIM.pdf?fbclid=IwAR2slZm1M4It4UY-Q99JGtxva0iYSyjtWW-sCSB_8L4Crx5eurh5aDVgDmg
- [37] Chavez, A. *Implementación del programa de planeación y control de la producción con base al sistema DBR de teoría de restricciones en una empresa Mexicana de fabricación de muebles*. Instituto politécnico nacional, Culhuacan, México. 2011.
- [38] Pimentel, A. *Sincronización y fenómenos colectivos modelos de redes complejas y votantes*. Ciudad de México. 2008.
- [39] Barceló, J. *Simulación de sistemas discretos*. Edición 4, Madrid. 1996.
- [40] Valle, O. *Monitoreo e indicadores. Organización de Estados Iberoamericanos*. Oficina Nacional en Guatemala. 2008.