

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CONTROL PARA SINCRONIZAR EL MOVIMIENTO DE DOS
ROBOTS”**

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ING. FABIÁN ÁNGEL VILLARREAL LACARRA

Director:

M.C. Rafael Armando Galaz Bustamante

Dedicatoria

A mis papás Maria de los Angeles y Jesús, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han animado a seguirme preparando espero que cada logro en mi vida sea un orgullo para ustedes los amo.

Agradecimientos

A Dios por bendecir mi vida en todos los aspectos, a Ivan, Dulce y Rocio que siempre han confiado en mí.

A mis maestros José Manuel Chávez, Rosalía Gutiérrez, Fredy Hernández, José Hoyo y Guillermo Valencia por todo lo que me enseñaron y que sigo aplicando.

Al Maestro Rafael Galaz que además de ser mi director se convirtió un mentor y un amigo durante estos dos años, me compartió mucho de su amplio saber.

A mis compañeros Linda, Leobardo, Felix, Ruben y Adrian que considero mis amigos con los que compartí muchos momentos de arduo trabajo y de sonrisas.

A Conacyt por el apoyo económico otorgado y al Instituto Tecnológico de Hermosillo por abrirme las puertas con los brazos abiertos por segunda vez, siempre estaré orgulloso de ser venado.

Resumen

En el Instituto Tecnológico de Hermosillo fueron donados dos robots industriales FANUC R2000-IA por FORD Hermosillo. Para que estos tengan una utilidad se necesita contar con una celda robótica que funcione para entrenamiento de alumnos y docentes en la realización de prácticas.

Resultado necesario la integración de estos robots con un controlador y otros equipos industriales para tener una celda robótica apta esto debido a que FORD Hermosillo tiene pocas personas capacitadas en este tipo de celdas.

Por lo que el presente documento propone la sincronización de movimiento de dos robots en conjunto con una banda transportadora, para lograrlo se hizo una investigación de los materiales para acompañar a los robots en su sincronización cuidando que estos se utilicen en el ámbito industrial.

Se realizó un estudio del estado del arte en los sistemas de control más utilizados en la industria, se usó una sincronización con control secuencial con un controlador lógico programable, se concluye emplear este método para problemas si se cuenta con este tipo de controladores y con aplicaciones reales.

Se llevó a cabo la construcción de la celda robótica y se encuentra actualmente funcionando en el Tecnológico.

Abstract

At the Instituto Tecnológico de Hermosillo, two industrial robots FANUC R2000-IA by FORD Hermosillo were donated.

For these to have a usefulness a robotic cell is needed that works to the training of students and teachers in the realization of practices. It is necessary to integrate these robots with a controller and other industrial equipment because FORD Hermosillo has few people trained in this type of cells.

Therefore, the present document proposes the synchronization of the movement of the robots in conjunction with a conveyor belt, to achieve an investigation of the materials to accompany the robots in their synchronization, taking care that they are used in the industrial field.

A state-of-the-art study was carried out on the most used control systems in the industry, a synchronization with the sequential control was used with a programmable logic controller, the use of this method for the problems is concluded and this type is available of drivers and real applications.

A construction of the robotic cell was carried out and it is working in the Technological.

Contenido

Capítulo.I Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación.....	4
1.3 Planteamiento del problema	5
1.4 Hipótesis.....	5
1.5 Objetivos	5
1.51 Objetivo general	5
1.52 Objetivos Particulares.....	5
1.6 Alcances del proyecto.....	6
1.7 Descripción de la estructura de la tesis	6
Capítulo II. Propuesta de solución.....	7
2.1 Sistemas modernos de fabricación	7
2.1.1 Sistemas de control	8
2.1.2 Sistemas de control en lazo abierto.....	9
2.1.3 Sistemas de control en lazo cerrado.....	9
2.2 Sistemas de control utilizados en la industria.....	10
2.2.1 Teorías de control en la industria	11
2.2.2 Control secuencial	11
2.3 Elementos en celdas robóticas.	13
2.3.1 Controlador lógico programable	13
2.3.2 Banda transportadora	17
2.3.3 Robot Industrial.....	17
2.3.4 Sensor.....	19
2.3.5 Herramienta del robot.....	22
2.3.6 Tablero de control	24
2.3.7 Interfaz hombre máquina.....	24
2.4 Redes industriales	25
2.5 Cinemática de Robots.....	30
2.5.1 Cinemática directa.....	30
2.5.2 Cinemática inversa.	31
2.5.3 Metodología de Denavit-Hartenberg.	31
2.6 Conclusión	33

Capítulo III. Propuesta de solución.....	34
3.1 Prototipo	34
3.2 Diseño de la celda robótica.	35
3.2.1 Fanuc R-2000IA.....	36
3.2.2 CompactLogix L30ER	39
3.2.3 Switch Stratix 2000.....	41
3.2.3 Panel View Plus 1250.....	42
3.2.4 Powerflex 525.....	42
3.2.6 Diseño de <i>gripper</i> (pinza)	43
3.2.7 Banda transportadora.....	45
3.2.8 Tablero de control	45
3.2.6 Modelo cinemático del robot Fanuc R-2000IA	46
3.3 Desarrollo del Prototipo.	49
3.3.1 Tipos de movimiento de robot Fanuc.....	49
3.3.2 Centro de herramienta (TPC).....	50
3.3.3 Configuración de herramienta.....	51
3.3.4 Asignación de Home position y masterizacion	54
3.3.5 Conexión de los robots con PLC.....	55
3.3.6 Programación del robot.....	58
Capítulo IV. Análisis de resultados	69
4.1 Resultados.	69
4.2 Velocidad de sincronización.	69
4.3 Cinemática del robot.	70
4.3 Integración de los elementos.	71
Capítulo V. Conclusiones.....	73
5.1 Conclusiones generales	73
5.2 Aportaciones	74
5.3 Recomendaciones a trabajos futuros	74
Referencias.....	75

Índice de figuras

Figura 1.1 Típica celda robótica con 5 estaciones de trabajo	2
Figura 1.2: Patrones de celda robótica. (a) Estación simple; (b) Estación paralela de trabajo.....	3
Figura 2.1: Sistema de control.....	8
Figura 2.2: Sistema de control lazo abierto.....	9
Figura 2.3: Sistema de control lazo cerrado.....	10
Figura 2.4: Grafico red de Petri	12
Figura 2.5: Matriz de incidencia genérica.....	13
Figura 2.6: Simple aplicación (a) cilindro hidráulico controlado por el plc (b) Programa en lenguaje escalera usado para controlar el cilindro.....	15
Figura 2.7: Ejemplo programación escalera.....	16
Figura 2.8: Representación de un robot cartesiano.....	18
Figura 2.9: Representación de un robot SCARA.....	18
Figura 2.10: Representación de un robot articulado.....	19
Figura 2.11: Representación de un robot paralelo	19
Figura 2.12: Encoder.....	20
Figura 2.13: Sensor inductivo.....	21
Figura 2.14: Efecto Hall.....	21
Figura 2.15: Sensor capacitivo.....	22
Figura 2.16: Acción de sujeción.....	23
Figura 2.17: Tipo de pinzas.....	24
Figura 2.18: Imagen de un HMI.....	25
Figura 2.19: Clasificación de las redes industriales.....	27
Figura 2.20: Cinemática directa e inversa.....	30
Figura 2.21: Cinemática directa.....	31
Figura 2.22: Cinemática inversa.....	31
Figura 2.23: Parametros DH.....	32
Figura 3.1: Sistema de control con PLC.....	34
Figura 3.2: Diagrama general del sistema.....	35
Figura 3.3: Componentes de la celda robótica.....	36
Figura 3.4: Robot Fanuc R2000IA.....	37
Figura 3.5: Sistema R-J3Ib.....	37
Figura 3.6: Teach pendal.....	38
Figura 3.7: Rack de la familia CompactLogix.....	39
Figura 3.8: Tarjeta 1769-OV16.....	40
Figura 3.9: Tarjeta 1769-IQ16.....	40
Figura 3.10: Fuente de alimentación 1769-PA4.....	40
Figura 3.11: Tarjeta 1769-OW16.....	41
Figura 3.12: Switch Stratix 2000.....	41

Figura 3.13: Panel View Plus 1250.....	42
Figura 3.14: PowerFlex 525.....	43
Figura 3.15: Piston SMC modelo CP95P.....	43
Figura 3.16: Electroválvula VFS2120-5DZ-02.....	44
Figura 3.17: Herramienta completa.....	44
Figura 3.18: Compresor.	45
Figura 3.19: Banda transportadora.	45
Figura 3.20: Gabinete.	46
Figura 3.21: Esquema de Robot Fanuc R2000ia 210f	47
Figura 3.22: Punto TCP en robot.	50
Figura 3.23: Paso 1 método 3 puntos.	51
Figura 3.24: Paso 2 método 3 puntos.	52
Figura 3.25: Paso 1 método 3 puntos.....	52
Figura 3.26: Final método 3 puntos.....	52
Figura 3.27: Cambio TCP.....	53
Figura 3.29: Señales en End Efector.....	54
Figura 3.30: Salidas de señales de control en End Efector.....	54
Figura 3.31: Modulo de entradas digitales AID16D.....	56
Figura 3.32: Modulo de salidas digitales AOR16G.....	56
Figura 3.33: Modulo de salidas digitales AOR16G.....	57
Figura 3.34: Conexiones al PLC del Robot 1.	57
Figura 3.35: Conexiones al PLC del Robot 2.....	58
Figura 3.36 Algoritmo robot 1.	59
Figura 3.37 Algoritmo robot 2.	60
Figura 3.38 Algoritmo PLC.	61
Figura 3.39 Diagrama Petri de cada robot.	63
Figura 3.40 Diagrama Petri de banda transportadora.	63
Figura 3.41 Diagrama Petri de la celda.....	64
Figura 3.42 Elementos escalera y Petri.....	64
Figura 3.43 Elementos lógicos escalera y Petri.....	65
Figura 3.44 Pantalla visualización HMI	66
Figura 4.1 Modelo en Matlab.	68
Figura 4.2 Control de movimiento en los ejes con Matlab.....	69
Figura 4.3 Control de movimiento en los ejes con Matlab.	69
Figura 4.4 Robot con banda transportadora.	70
Figura 4.5 Gabinete con controladores de los robots.....	70

Índice de tablas

Tabla 1.1: Lista de los fabricantes en el mercado global.....	15
Tabla 3.1: Parámetros DH del robot Fanuc R2000IA.....	47
Tabla 4.1: Velocidades y tiempos.....	67
Tabla 4.2: Resultado de DH en Matlab.....	68

Capítulo I.

Introducción

1.1 Antecedentes

Los robots están tomando cada vez más importancia en la vida del hombre, los humanos diseñamos y construimos estas máquinas para ayudarnos a realizar diversas actividades tales como el manejo de materiales peligrosos, tareas que están más allá de la capacidad natural del ser humano y actividades en entornos donde la vida humana está en peligro[1].

El uso de robots industriales aumenta continuamente entre las empresas manufactureras. Las empresas utilizan robots industriales en para aumentar la productividad, seguridad, calidad del producto, consistencia y flexibilidad. Sin embargo, para obtener el máximo beneficio de esta inversión de alto costo, se requiere resolver uno de los problemas operativos más importantes que es la secuenciación y programación de las partes del robot[2].

La demanda de hacer sistemas de dos o más robots ha ido en aumento. Incluso si un solo robot puede lograr la tarea dada, la implementación de un sistema con dos robots puede ser preferible, ya que puede conducir potencialmente a una mejora considerable en el rendimiento de producción. Curiosamente, en los entornos de fabricación, la mayoría de los estudios se han basado en celdas con un solo robot y el uso de múltiples robots ha sido menos investigado[3].

La industria manufacturera asociada de computadoras, comunicaciones y la electrónica de consumo, la llamada industria 3C, se ha convertido en una de las industrias más importantes. Sin embargo, con la excepción de la fabricación de módulos que se lleva a cabo mediante la automatización, los otros tres procesos de producción importantes, que incluyen ensamblaje, prueba y empaque, dependen en gran medida del trabajo manual. Los crecientes requisitos de acciones más finas en procesos de ensamblaje para

productos 3C mucho más compactos casi van más allá de la capacidad humana. La producción de 3C es extremadamente sensible a los plazos y los costos, ya que el proceso de fabricación no permite interrupciones y el tiempo de comercialización es exigente. Por lo tanto, cómo cumplir con el corto plazo de entrega, la alta calidad exigente y el volumen masivo de productos con una gran cantidad de trabajadores manuales poco calificados es uno de los mayores desafíos para los OEM (fabricantes de equipos originales). Si bien los productos 3C se consideran productos de alto valor agregado, este valor agregado no se encuentra en los sitios OEM. El estrecho margen de ganancia dificultará la supervivencia de los fabricantes de 3C en el futuro a medida que aumenten los costos laborales[4].

Como resultado, los fabricantes de 3C están más o menos obligados a presentar soluciones robotizadas, con el objetivo de reducir costos y mejorar la productividad. La celda robótica, como se muestra en la Figura 1.1, es una unidad normal para este tipo de montaje automático[4].

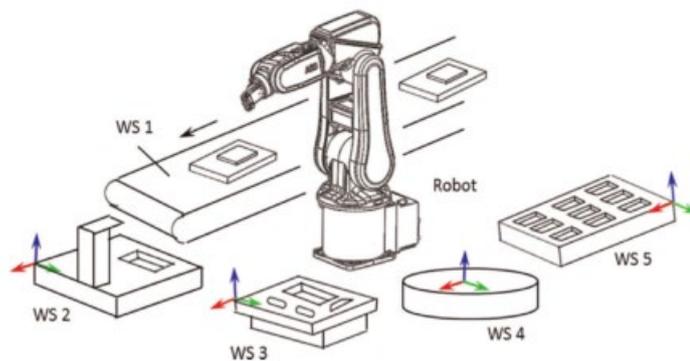


Figura 1.1 Típica celda robótica con 5 estaciones de trabajo.

Es, en esencia, un taller de flujo con un número fijo de etapas de procesamiento, en diferentes estaciones de trabajo. En cada etapa, se requiere al menos una estación de trabajo simple para implementar el proceso correspondiente. En cada ciclo, el robot realiza las siguientes actividades, incluida la carga de una pieza de trabajo, el desplazamiento entre cada par de estaciones de trabajo, la descarga de una pieza de trabajo y la espera parcial o total de la pieza de trabajo procesada. Normalmente, el tipo de pinzas típicamente es pinza simple o doble, los tipos de disposición de estaciones de trabajo son estaciones de trabajo simples o estaciones de trabajo paralelas, como se muestra en la Figura 1.2, forman diferentes patrones de células robóticas[4].

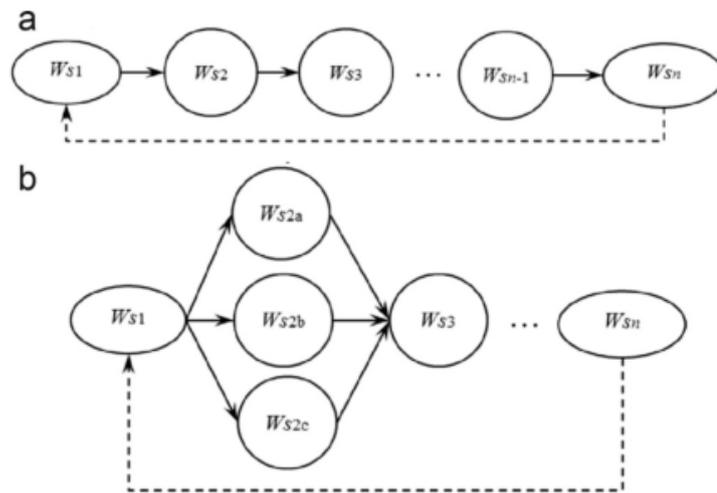


Figura 1.2: Patrones de celda robótica. (a) Estación simple; (b) Estación paralela de trabajo.

El diseño óptimo de la celda se obtiene al minimizar el tiempo de ciclo de trabajo del robot requeridas para realizar una secuencia de viajes. Minimizando el tiempo de ciclo del robot mejorará la tasa de producción de la fabricación aumentar la vida del robot. Muchos investigadores estaban interesados en optimizar el viaje tiempo de movimiento en las articulaciones del robot entre un grupo de máquinas y sitios de trabajo[4].

Las celdas robóticas se utilizan ampliamente en la industria de fabricación moderna, como para hacer la placa de circuito impreso, sistemas de fabricación de semiconductores, producción de hierro y en la industria automotriz entre otras. En esencia, una celda robótica consiste en un dispositivo de entrada, varias etapas de procesamiento, un dispositivo de salida y un robot manipulador para piezas y transporte de ellas[5]. En general, las partes ingresan al dispositivo de entrada, pasan a través de cada etapa en base a una secuencia predeterminada, dejan el sistema a través del dispositivo de salida. Como no hay almacenamiento temporal entre máquinas y cada una las máquinas solo pueden procesar la parte de su trabajo. Una programación válida para una celda es un esquema mejorará la estabilidad y la productividad de la célula robótica, y es una forma efectiva de aumentar los ingresos ya que aumentas la productividad, este aumento se hace más pronunciado para las células robóticas más grandes que emplean múltiples robots. Por lo tanto, la programación es un mecanismo que tiene que ser estudiado cuidadosamente[5].

La era del robot se acerca, los robots han sido dramáticamente beneficiosos para industria, y su impacto está aumentando a medida que comienzan a prestar servicios en diversas áreas de la vida cotidiana una de las más prometedoras. Las aplicaciones de la robótica, en general, son robots de servicio diseñados para uso educativo, que tiene un gran potencial. El uso de la robótica puede contribuir a la educación de muchas maneras. Primero, los robots pueden proporcionar grandes beneficios como herramienta de enseñanza. Tienen muchas características útiles que hacerlos útiles para enseñar cuando se combinan con los objetivos de instrucción: la capacidad para realizar tareas repetitivas

con precisión (repetibilidad), flexibilidad, la capacidad de presentar datos digitales. En segundo lugar, los robots pueden facilitar el aprendizaje. En general, el uso de robots proporciona aprendizajes con actividades divertidas y experiencias prácticas, que ayudan a crear un ambiente atractivo. Tercero, los robots apoyan el desarrollo de las habilidades de aprendizaje del siglo XXI. Basado en tareas y los diseños de cursos orientados a proyectos en educación robótica también desafían a los estudiantes a mejorar sus habilidades de resolución de problemas y motivarlos a ser estudiantes activos[5].

El uso de los robots cada vez es más notable, hoy en día ya que la mayoría de los procesos automáticos son utilizados, como el caso de la fabricación de autos donde en las líneas de producción estos desempeñan tareas como soldar, pintar y manipular piezas de forma automática.

1.2 Justificación

Dado que los robots desempeñan un papel importante en la industria desde hace varias décadas, la educación en robótica es importante en los planes de estudios de ingeniería. La enseñanza en robots reales es crítica debido a la alta dinámica y potencia de estos dispositivos se tiene que implementar medidas de seguridad muy estrictas y eso disminuye la posibilidad de hacer prácticas reales para los estudiantes además que las escuelas no cuentan con recursos para obtener robots de última tecnología[6].

Para nuestro tecnológico es importante tener la celda robótica y el hacer un sistema de control para sincronizar el movimiento de los robots con los demás componentes dará el avance para que los alumnos y maestros puedan hacer uso de la celda.

En la industria han estado surgiendo problemas ya que están necesitados de personal calificado para la instalación, programación y sincronización de robots industriales.

Lo que se pretende realizar en este trabajo es la sincronización controlada de robots ya que se ha convertido en un tema de interés dentro de la comunidad científica durante la última década, debido a los requerimientos de eficiencia y calidad en los procesos de producción, así como de flexibilidad y maniobrabilidad en la ejecución de tareas que un solo robot no puede realizar y para lo cual es necesario hacer que dos o más robots lleven a cabo una misma acción de manera sincronizada. El objetivo de la sincronización de dos sistemas dinámicos que evolucionan en forma separada, uno denominado maestro y otro esclavo, es que se acoplen o coincidan en una trayectoria de evolución común a partir de un cierto instante en adelante [7].

La sincronización de varios brazos robóticos sirve para evitar colisiones mientras llevan a cabo algunas tareas determinadas dentro de una celda robótica es un problema frecuente en la robótica, tanto en aplicaciones industriales como de servicio[8].

1.3 Planteamiento del problema

Esta investigación es parte del proyecto celda robótica para entrenamiento del Tecnológico Nacional de México donde se pretende crear una celda robótica de investigación y entrenamiento para personal docente y alumnos del Instituto Tecnológico de Hermosillo, esta tendrá al menos dos robots industriales donados por Planta FORD Hermosillo con el fin de tener más profesionista egresados capacitados en el control, sincronización y coordinación de robots, para realizar tareas complejas aplicadas y aprender la operación segura de los mismos con esto afianzar conocimientos en el área de robótica.

Es por eso que es importante que el tecnológico cuente con este celda robótica la cual tendrá la integración de los robots con más equipo industrial de última tecnología y además diseñar un sistema de control para sincronizar estos robots será de gran utilidad para la comunidad estudiantil ya que estarán listos para su uso y podrán simular problemas aplicados a la industrial ya que el equipo con el cual se maneja a los robots, estos son muy utilizados en las grandes empresas en la actualidad.

Este trabajo pretende dar la solución de encontrar un sistema de control para sincronizar los robots con una banda transportadora, esta va a variar la velocidad y los robots tienen que ser capaces de seguir con el mismo proceso, aunque aumente o disminuya.

1.4 Hipótesis

La sincronización de los robots permitirá el uso de la celda robótica a maestros y alumnos del tecnológico.

1.5 Objetivos

1.51 Objetivo general

Sincronizar el movimiento de dos robots que operan en conjunto con una banda transportadora a una velocidad variable.

1.52 Objetivos Particulares

- Analizar y seleccionar la información necesaria para la investigación.
- Determinar que componentes se van a utilizar en la celda robótica.
- Demostrar el funcionamiento del sistema.

- Establecer el sistema en el laboratorio.

1.6 Alcances del proyecto

- La solución del proyecto será resuelta de la manera más aplicada a la industria posible para poder cumplir con los puntos mencionados anteriormente.
- El proyecto se ajustará a lo que alcance el recurso asignado.

1.7 Descripción de la estructura de la tesis

La estructura de esta tesis será compuesta de cinco capítulos de la siguiente manera:

En el capítulo II se presentarán los fundamentos de la investigación además de los materiales que se requieren para la construcción de la celda robótica.

El capítulo III estará compuesto de los pasos para la construcción de la celda robótica, en la cual se desarrollará la estructura física además de la programación en cada elemento.

En el capítulo IV se encuentra el análisis de los resultados obtenidos de la celda robótica en funcionamiento.

Las conclusiones de este documento se encuentran en el capítulo V.

Capítulo II. Propuesta de solución.

2.1 Sistemas modernos de fabricación

Los sistemas modernos de fabricación, como las celdas robóticas, incorporan automatización y procesamiento repetitivo para acelerar la producción y cumplir con los estrictos requisitos especificados por los clientes. El rendimiento de un sistema es un factor importante que debe considerarse en el diseño y la operación de las celdas de fabricación para garantizar que sean competitivas comercialmente[9].

Muchas industrias utilizan sistemas de manejo automatizados, como robots industriales, para transmitir materias primas a través de múltiples etapas de producción. Para obtener el máximo retorno de la inversión utilizando dichos sistemas, se deben determinar las secuencias de acción eficientes y los programas de piezas. Se han aplicado muchos métodos de programación para obtener el máximo rendimiento de estos sistemas automatizados[9]. Sin embargo, la programación es una tarea muy difícil en los sistemas de fabricación de la vida real debido a las complejas rutas de las piezas, la necesidad de interacciones hombre máquina y las variaciones en los productos manufacturados, entre otras preocupaciones. Un desafío importante que se encuentra al aplicar algoritmos de programación a sistemas reales es que la mayoría de los algoritmos siguen un marco específico, es decir, el de un taller de trabajo o de flujo, y estos marcos rara vez se corresponden perfectamente con sistemas reales. [9].

2.1.1 Sistemas de control

Para poder llevar a cabo la sincronización de los robots con otros elementos es necesario construir un sistema de control por lo que se dará una breve introducción a estos.

Un sistema dinámico puede definirse como un ente que recibe unas acciones externas o variables de entrada, y cuya respuesta a estas acciones externas son las denominadas variables de salida[10].

Las acciones externas al sistema se dividen en dos grupos, variables de control, que se pueden manipular, y perturbaciones sobre las que no es posible ningún tipo de control. La Figura 2.1 ilustra de un modo conceptual el funcionamiento de un sistema[10].

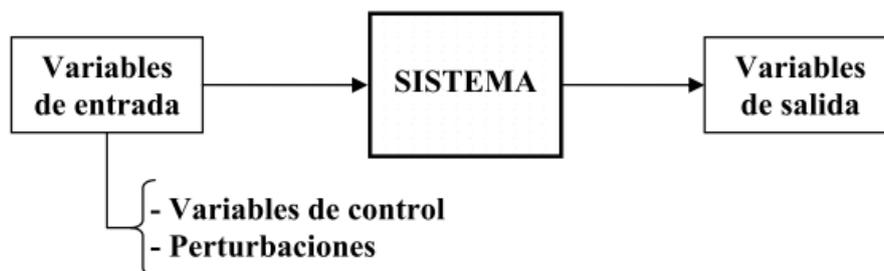


Figura 2.1: Sistema de control.

Dentro de los sistemas se encuentra el concepto de sistema de control. Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados[10].

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

1. Garantizar la estabilidad y, particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
2. Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido. Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.
3. Ser implementado y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes[10]:

- Sensores. Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.
- Controlador. Utilizando los valores determinados por los sensores y la consigna impuesta, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control en base a cierta estrategia.

- Actuator. Es el mecanismo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control.

2.1.2 Sistemas de control en lazo abierto

Aquellos en los que la variable de salida (variable controlada) no tiene efecto sobre la acción de control (variable de control)[11].

No se compara la salida del sistema con el valor deseado de la salida del sistema (referencia), además cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fijada y en presencia de perturbaciones estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente[11].

El control en lazo abierto suele aparecer en dispositivos con control secuencial, en el que no hay una regulación de variables, sino que se realizan una serie de operaciones de una manera determinada como se muestra en la Figura 2.2. Esa secuencia de operaciones puede venir impuesta por eventos o por tiempo. Se programa utilizando PLCs (controladores de lógica programable) [11].

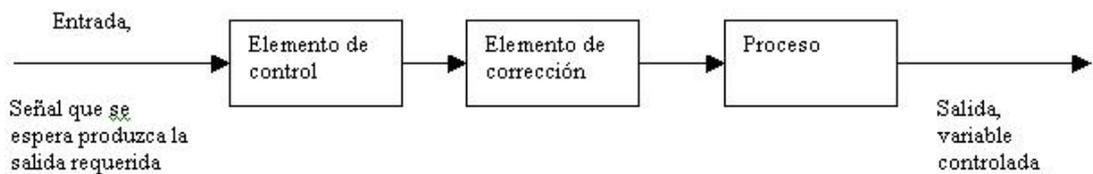


Figura 2.2: Sistema de control lazo abierto.

2.1.3 Sistemas de control en lazo cerrado

Sistema de control en lazo cerrado aquellos en los que la señal de salida del sistema (variable controlada) tiene efecto directo sobre la acción de control (variable de control) [11].

Operación que en presencia de perturbaciones tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia. Esta reducción se logra manipulando alguna variable de entrada del sistema, siendo la magnitud de dicha variable de entrada función de la diferencia entre la variable de referencia y la salida del sistema como se observa en la Figura 2.3 [11].

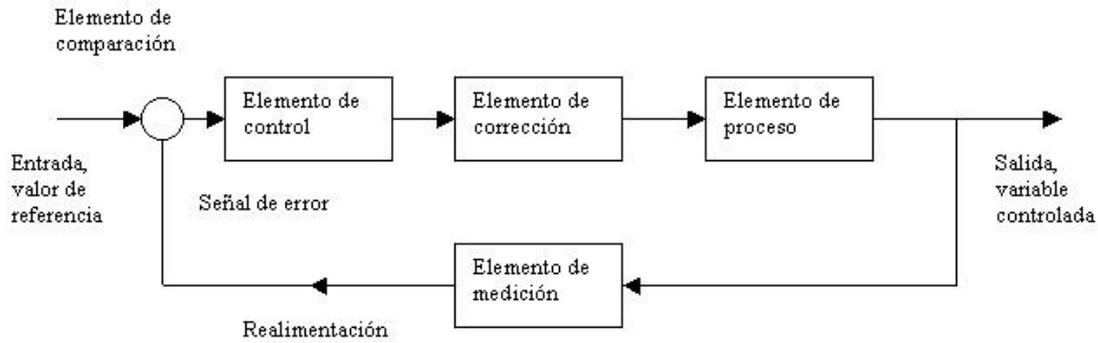


Figura 2.3: Sistema de control lazo cerrado.

2.2 Sistemas de control utilizados en la industria.

Debido a que se trabajara con la sincronización dos Robots industriales es necesario encontrar un método de control adecuado para poder efectuarlo en este punto se hará una revisión bibliográfica de los métodos más comunes en la industria.

En la industria destaca el uso de estaciones robotizadas en tareas de soldadura al arco o por puntos, pintura, montaje, etc. De forma que en la actualidad la necesidad de automatización es elevada si se desea ofrecer productos de calidad en un entorno competitivo. Uno de los temas principales a resolver en la industria es la planificación y gestión de la producción: asignación de tareas a máquinas, diseño de la planta, sistemas flexibles que fabriquen diversos productos, políticas de planificación cercanas a la optimización, etc[12].

En cuanto a la industria de procesos, existen fábricas de productos de naturaleza más o menos continua, como la industria petroquímica, cementera, de la alimentación, farmacéutica, etc. En este tipo de industria, destacan la aplicación de algoritmos de control avanzado, - como, por ejemplo, el control predictivo -, o la formación experta de operarios de salas de control mediante simuladores. Respecto a las necesidades de automatización, la industria de procesos tiene un nivel consolidado en cuanto a salas de control con sistemas de control distribuido (DCS), y el uso de autómatas programables para tareas secuenciales o para configurar sistemas redundantes seguros ante fallos, entre otros elementos[12].

No hay que olvidar que las industrias tanto la manufacturera como la de procesos-realizan grandes esfuerzos en la optimización del proceso. Algunas de ellas se centran en el aspecto de la calidad, mientras que otras se centran en el aspecto de los costes[12].

Estos factores mejora de la calidad del producto y disminución de costos en la producción, son los condicionantes fundamentales en estas industrias, y en este sentido la automatización industrial contribuye bastante desde que a finales de la década de los años setenta apareció el microprocesador, núcleo de los controladores comerciales presentes en el mercado como los autómatas programables, los controles numéricos y los armarios de control de robots manipuladores industriales[12].

2.2.1 Teorías de control en la industria

En cuanto a la expresión control de procesos industriales, ésta abarca, desde un punto de vista académico, la teoría de control básica de realimentación y acción PID, la instrumentación de control (sensores, actuadores, dispositivos electrónicos, etc.), la aplicación a procesos industriales (como, por ejemplo, la mezcla de componentes en un reactor químico), las diversas arquitecturas de control (centralizado, distribuido), las estructuras de control y la teoría de control avanzada (control predictivo, control multivariable, etc.), por citar algunos de los aspectos más relevantes[12].

2.2.2 Control secuencial

El control secuencial propone estados (operaciones a realizar para la transformación de la materia prima en producto) y transiciones (información relativa a sensores o elementos lógicos como temporizadores o contadores) en una secuencia ordenada que identifica la evolución dinámica del proceso controlado. En la regulación continua, mediante la estructura de control clásica *feedback*, se aborda la acción de control proporcional, la acción de control derivativo o la acción de control integral, respecto al error (diferencia entre la consigna y la medida de la variable de salida del proceso) para conseguir así una regulación adecuada de la variable (temperatura, caudal, nivel, etc.) [12].

Respecto a instrumentación de control, los tres elementos básicos capaces de llevar a cabo el control secuencial o la regulación continua dentro del control de procesos industriales son el llamado autómatas programables PLC, el ordenador industrial y los reguladores industriales (tanto en versión analógica como digital). Estos tres elementos comparten protagonismo y es frecuente encontrar artículos de opinión donde se comenta el futuro de la utilización de los PLC ante las continuas mejoras del control realizado mediante ordenador. Cada uno de estos elementos halla su aplicación en la industria actual, y es por ello que la tendencia en los próximos años sea la de continuar utilizándolos[12].

El análisis y diseño de circuitos secuenciales se encuentra relacionado con el control secuencial, denominado también control lógico o control binario(ON/OFF), en los sistemas de control secuencial las entradas y salidas son de tipo binario y determinan una serie de pasos para la operación de un proceso[13].

Cuando el sistema secuencial es pequeño se realiza con circuitos digitales combinatorios y cuando es grande se realiza con PLC (controladores lógicos programables)[13].

El sistema de eventos discretos (DES) se define como un sistema que requiere que la ocurrencia de eventos cambie su estado. El proceso de abrir / cerrar de una puerta, por ejemplo, es un DES, ya que permanecerá abierto o cerrado, es decir, en el mismo estado hasta que se realice alguna acción en él[14].

Redes de Petri

Las redes de Petri es una técnica utilizada para modelar DES, que se realiza mediante representación gráfica o matricial. En la representación gráfica, hay cuatro componentes básicos[14]:

1) Lugares: representados gráficamente por círculos. Los lugares almacenan *tokens*.

2) Tokens: Representados por puntos, se desplazan de un lugar a otro mediante la activación de transiciones.

3) Transiciones: están habilitadas si los lugares inmediatamente anteriores tienen un número de tokens igual o mayor que el peso del arco que parte del lugar (es). Están representados por rectángulos.

4) Arcos: están representados por flechas y necesariamente deben conectar un lugar a una transición o viceversa. Su peso indica cuántos tokens se tomarán de un lugar y se enviarán a otro.

La Figura 2.4 muestra el modelo gráfico de una PN genérica de token negro.

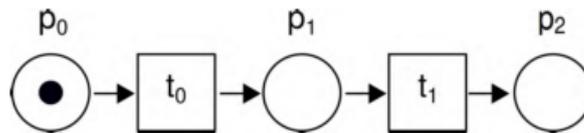


Figura 2.4: Grafico red de Petri

Por lo tanto, p₀, p₁ y p₂ son lugares; t₀ y t₁ son transiciones;

Las flechas son los arcos y el punto negro indica que el lugar p₀ tiene un token, lo que significa que la marca inicial (la representación matricial del número de tokens que cada lugar tiene en el instante analizado) E₀ es [1 0 0]. Por lo tanto, la marca E_{i+1}, para i = 0,1,2,3... de una PN se define mediante la ecuación (2.1).

$$E_{i+1} = E_i + T_i * G \quad (2.1)$$

Dónde:

- E = matriz de marcado
- G = matriz de incidencia
- T = matriz de transición

De esta manera, independientemente del camino que debe seguir el robot, el valor del primer término de la matriz de marcado inicial es siempre 1 y los otros valores de la matriz son 0. La matriz de transición se compone de la indicación de qué transiciones están habilitadas y qué transiciones no son para cada marca T_i. Por lo tanto, para el PN presentado en la Figura 2.4, T₀ es [1 0]. Cada ruta tiene una identidad, que está representada por la matriz de incidencia A. El número de filas y columnas en esta matriz está determinado por el número de transiciones y lugares, respectivamente. La Figura 2.5 muestra una Matriz de Incidencia Genérica G. donde[14]:

$$a_{nm} = a_{nm}^+ - a_{nm}^- \quad (2.1)$$

De la ecuación (2), a_{nm}^+ es igual al peso del arco dejando la transición n llegando al lugar m . De manera análoga, a_{nm}^- es igual al peso del arco que sale del lugar m y que llega a la transición n [14].

$$G = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}$$

Figura 2.5: Matriz de incidencia genérica.

2.3 Elementos en celdas robóticas.

En muchas aplicaciones industriales, particularmente en la industria del automóvil hay múltiples robots de trabajo, cerca uno del otro, a veces incluso varios dentro de cada espacio de trabajo. En tales casos, obviamente, hay un riesgo que los robots colisionen y para prevenir esto, tiene que ser coordinando el espacio de trabajo.

Se realiza mediante un PLC (programable Controlador lógico) que interactúa con los robots para administrar dinámicamente el intercambio.

La implementación y verificación de la coordinación para evitar una colisión es inminente, los programas de robot para señalar y esperar a que el controlador para permitir que uno de los robots proceda, en la industria automotriz se denominan a tal control como enclavamientos.

2.3.1 Controlador lógico programable

Los PLC (controladores lógicos programables) están basados en computadora, dispositivos de estado sólido, de un solo procesador que emulan el comportamiento de un diagrama de escalera eléctrica capaz de controlar muchos tipos de equipos industriales y sistemas automatizados completos. Los *PLC* son generalmente una parte principal de los sistemas automáticos en la industria. Son muy eficientes y fiables en aplicaciones que implican el control secuencial y la sincronización de procesos y elementos auxiliares en las industrias manufacturera, química y de procesos. Además de tener las ventajas tecnológicas de usar PLC, también disminuye los precios en el nivel avanzado y el sistema de control complejo[15].

Hoy en día, la mayoría de los elementos de control utilizados para ejecutar la lógica del sistema fueron sustituidos por los PLC. El término lógica se usa porque la programación es principalmente para implementar operaciones lógicas y de conmutación. Los dispositivos de entrada como los interruptores y los dispositivos de salida, como los motores, que se controlan están conectados al PLC y luego el controlador supervisa las entradas y salidas de acuerdo con la máquina o el proceso. Originalmente, los PLC se

diseñaron como un reemplazo para los sistemas de control de lógica de temporizador y relé cableados. (Significa que todos los componentes fueron conectados manualmente por cables). El PLC consta de dos partes, es decir, el hardware y el *software* del PLC[15].

Los PLC fueron utilizados por primera vez por la industria automotriz a finales de la década de 1960, su equipo automatizado estaba controlado principalmente por circuitos discretos e inflexibles que consistían en relés electromecánicos y bobinas cableadas en los paneles. General Motors desarrolló las especificaciones para un controlador programable que podría reemplazar los circuitos de relés cableados.

La idea más radical fue la implementación de un lenguaje de programación basado en un diagrama esquemático de relés, con entradas (desde interruptores de límite, pulsadores, etc.) representados por contacto de relé y salidas (a solenoides, arrancadores de motor, lámparas, etc.) representado por bobinas de relé. La Figura 2.5 (a) muestra un cilindro hidráulico simple que puede extenderse o retraerse mediante botones.

Su carrera se establece mediante interruptores de límite que se abren al final del recorrido, y los solenoides solo se pueden operar si la bomba hidráulica está funcionando. Esto sería controlado por el programa de computadora de la Fig. 2.5 (b) que es idéntico al circuito de relevo necesario para controlar el cilindro. Estos programas se parecen a los peldaños de una escalera y, en consecuencia, se llama "Diagramas de escalera". A mediados de la década de 1960, Hydramatic, una división de General Motors Corporation, imaginó que una computadora podría usarse para realizar las funciones lógicas que luego realizaban los relés. El equipo de ingeniería escribió una lista de características del dispositivo informático propuesto. GM inició el desarrollo del dispositivo informático especificando ciertos criterios de diseño, que incluyen[15]:

- El dispositivo debe ser duradero para que pueda operar en ambientes hostiles (aire sucio, humedad, vibración, ruido eléctrico,
- etc.) encontrado en una fábrica
- Debe proporcionar flexibilidad al implementar modificaciones de circuitos de forma rápida y fácil mediante cambios de software.
- Debe estar diseñado para usar un lenguaje de programación en forma de diagrama de escalera que ya sea familiar para técnicos y electricistas.
- Debe permitir que el cableado de campo finalice en los terminales de entrada / salida del controlador.

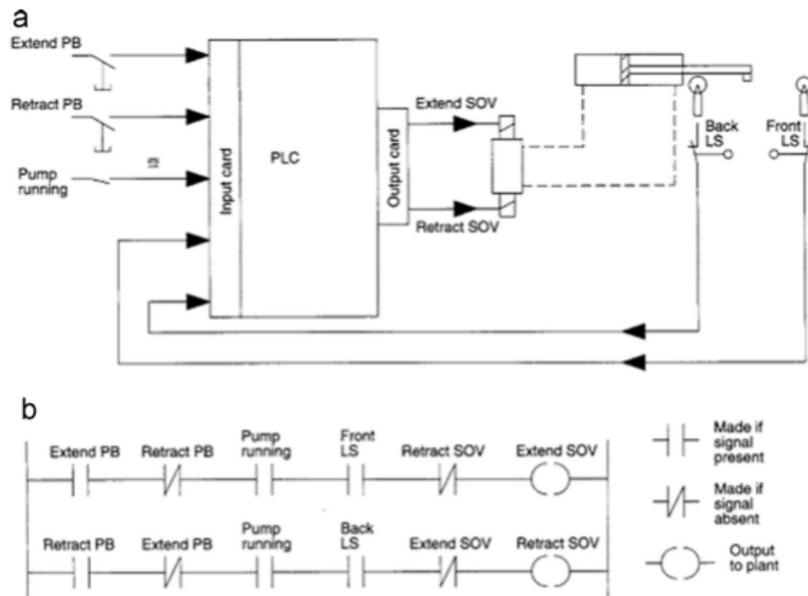


Figura 2.6: Simple aplicación (a) cilindro hidráulico controlado por el plc (b) Programa en lenguaje escalera usado para controlar el cilindro.

GM usó esta lista de especificaciones cuando solicitó a las compañías interesadas que desarrollaran un dispositivo que cumpliera con los requisitos de diseño. Dick Morley concibió el primer controlador programable el 1 de enero de 1968. Cuando su compañía, Gould Modicon Company desarrolló el primer PLC, se instaló el primer PLC modelo 084 en la División Oldsmobile de General Motors Corporation y Landis Company en Landis, Pennsylvania. El primer PLC fue grande y costoso. Solo podían controlar On-Off, lo que limitaba sus aplicaciones a operaciones que requerían movimientos repetitivos. Innovaciones y mejoras en la tecnología de microprocesadores y las técnicas de programación de software han agregado más características y capacidades al PLC. Estas mejoras permiten al PLC realizar aplicaciones más complejas de control de movimiento y proceso, y con mayor velocidad. En la actualidad, más de una docena de fabricantes producen PLC, como se muestra en la Tabla 1.1. La mayoría de estas compañías fabrican varios modelos que varían en tamaño, costo y sofisticación para satisfacer las necesidades de aplicaciones específicas[15].

No	Manufacturer	No	Manufacturer
1	Siemens	9	Panasonic
2	ABB	10	Idec
3	Schneider (Modicon)	11	Keyence
4	Rockwell (Allen-Bradley)	12	Toshiba
5	Mitsubishi	13	Fuji
6	GE-Fanuc	14	Beckhoff
7	Omron	15	Bosch Rexroth
8	Koyo	16	Rockwell/Allen-Bradley

Tabla 1.1: Lista de los fabricantes en el mercado global.

Hardware PLC

La versión moderna del sistema de lógica de escalera es el controlador programable. Todos los sistemas PLC están compuestos por los mismos bloques de construcción básicos que detectan datos entrantes, los procesan y controlan varias salidas. Los bloques básicos son[15];

- Rack de ensamble
- Fuente de alimentación
- Dispositivo de programación
- Sección de entrada / salida
- Unidad Central de Procesamiento (CPU)

Programación PLC

Los PLC son ampliamente utilizados en el control de la automatización. Ellos conducen líneas de ensamblaje, robots y plantas químicas completas. El sistema de red puede incorporarse bien con la aplicación PLC para diversas funciones. El estándar IEC 61131-3 define una cantidad de lenguajes de programación para PLC. Estos idiomas van desde los gráficos de alto nivel con poderosas posibilidades de estructuración hasta lenguajes de bajo nivel cercanos al diseño del circuito o el lenguaje de la máquina. La forma más común de programar un PLC es diseñar el circuito de control deseado en la forma de un diagrama de escalera lógica y luego ingrese este diagrama de escalera en un terminal de programación. El terminal de programación es capaz de convertir el diagrama de la escalera en códigos digitales y luego enviar este programa al PLC donde está almacenado en la memoria. A continuación, en la figura 2.7 se muestra un ejemplo de programación escalera.

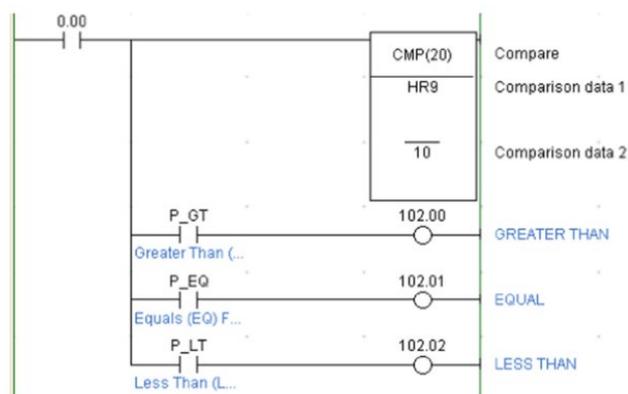


Figura 2.7: Ejemplo programación escalera.

2.3.2 Banda transportadora

La mecanización y automatización de los sistemas de transporte de productos, materias primas e incluso personas es ya una constante en la industria. Para realizar esto se emplea una banda transportadora. Una banda transportadora es un sistema de transporte consistente en una cinta que se mueve continuamente entre dos tambores. Esta banda es arrastrada por fricción por uno de los dos tambores, que es accionado por un motor. El otro tambor gira libremente y tiene como función el de servir de retorno a la banda. Entre los dos tambores la banda es soportada por rodillo[16].

El material depositado sobre la banda es transportado hacia el tambor con motor de accionamiento, que es precisamente donde la banda gira y da vuelta en sentido contrario. Cuando el material de la banda llega a esta zona sale fuera de la misma por la acción de la fuerza de gravedad[16].

Las bandas transportadoras se utilizan para el transporte de:

- Materiales como carbón, minerales y cereales
- Transporte de personas en recintos cerrados
- Cargar y descargar buques cargueros o camiones
- Transportar material por terreno inclinado

Tipos de bandas transportadoras:

- De tornillo
- De suelo móvil
- De rodillos

2.3.3 Robot Industrial

Un robot es una máquina que realiza tareas rutinarias, pueden realizar con series de acciones complejas de forma automática, especialmente una vez programadas por computadora. Son un dispositivo mecánico que se puede usar para seguir un conjunto de instrucciones. El *Robot Institute of America* definió un robot en 1979 como "un multifuncional y programable diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especializados a través de varias instrucciones programadas para el desempeño de una variedad de tareas[5].

Robot industrial definido por la norma ISO 8373: 2012: Un control automático, reprogramable, multipropósito. Manipulador programable en tres o más ejes, que pueden ser ya sea fijo o móvil para uso en automatización industrial aplicaciones.

Los términos utilizados en la definición anterior se explican con más detalle a continuación:

- Reprogramable: Diseñado para que los movimientos programados o las funciones auxiliares puedan cambiarse sin alteración física.

- Multipropósito: Capaz de adaptarse a una aplicación diferente con alguna alteración física.
- Alteración física: Alteración del sistema mecánico (el sistema mecánico no incluye medios de almacenamiento, ROM, etc.).
- Eje: Dirección utilizada para especificar el movimiento del robot en un modo lineal o rotativo.

Clasificación del Robot Industrial

- Robot cartesiano: robot cuyo brazo tiene tres articulaciones prismáticas y cuyos ejes coinciden con un sistema de coordenadas cartesiano(figura 2.8).

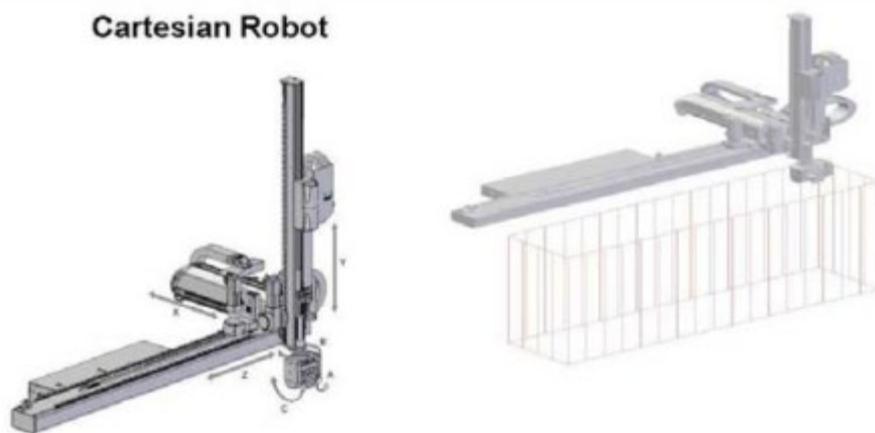


Figura 2.8: Representación de un robot cartesiano.

- Robot SCARA: un robot, que tiene dos juntas rotativas paralelas para proporcionar conformidad en un plano (figura 2.9).

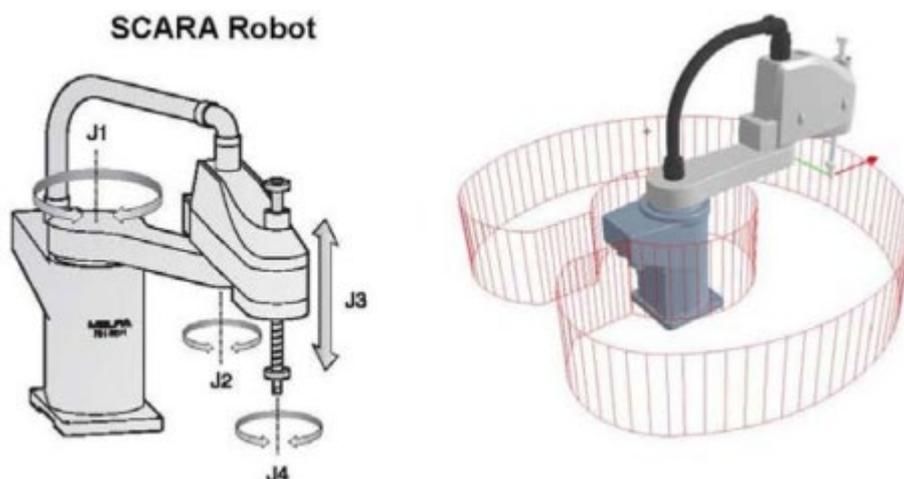


Figura 2.9: Representación de un robot SCARA.

- Robot articulado: un robot cuyo brazo tiene al menos tres articulaciones giratorias (figura 2.10).

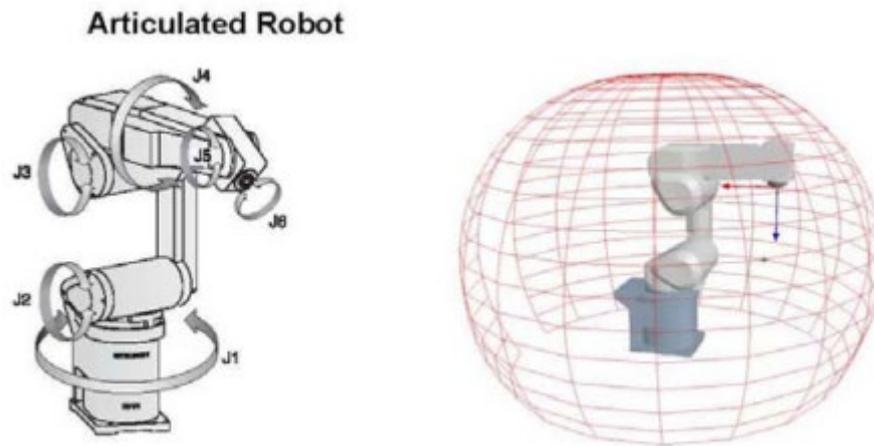


Figura 2.10: Representación de un robot articulado.

- Robot paralelo: un robot cuyos brazos tienen articulaciones prismáticas o rotativas concurrentes. Robot cilíndrico: un robot cuyos ejes forman un sistema de coordenadas cilíndricas (figura 2.11).

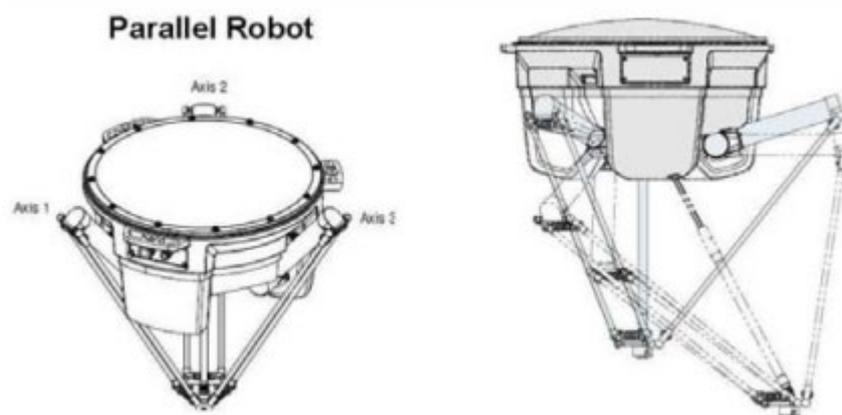


Figura 2.11: Representación de un robot paralelo

2.3.4 Sensor

En cualquier proceso de automatización es necesario tener sensores ya que estos dan información de lo que está pasando en el sistema, los robots cuentan con sensores internos y además se tienen que agregar los sensores externos necesarios según el procedimiento de la celda.

Un sensor es un dispositivo eléctrico y/o mecánico que convierte magnitudes físicas (luz, magnetismo, presión, etc.) en valores medibles de dicha magnitud. Esto se realiza en tres fases[17]:

1. Un fenómeno físico a ser medido es captado por un sensor, y muestra en su salida una señal eléctrica dependiente del valor de la variable física.
2. La señal eléctrica es modificada por un sistema de acondicionamiento de señal, cuya salida es un voltaje.

3. El sensor dispone de una circuitería que transforma y/o amplifica la tensión de salida, la cual pasa a un conversor A/D. El convertidor A/D transforma la señal de tensión continua en una señal discreta.

Sensores internos

Sensores integrados en la propia estructura mecánica del robot, que dan información del estado del robot: fundamentalmente de la posición, velocidad y aceleración de las articulaciones[17].

Sensores externos

Dan información del entorno del robot: Alcance, proximidad, contacto, fuerza, etc. Se utilizan para guiado de robots, para identificación y manipulación de objetos[17].

Encoder del robot

Constan de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí, de un sistema de iluminación y de un elemento foto receptor. El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco, a medida que el eje gira se van generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese las marcas, llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje. La resolución depende del número de marcas que se pueden poner físicamente en el disco(Figura 2.12)[17].

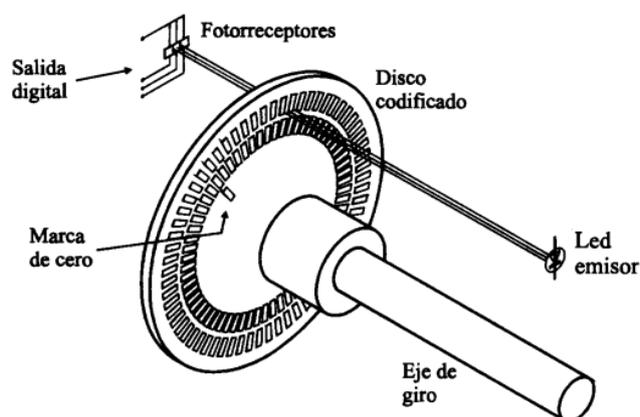


Figura 2.12: Encoder.

Sensores de proximidad

Detección de objetos próximos, antes del contacto para agarrar o evitar un objeto.

Sensores inductivos

Modificación de un campo magnético por presencia de objetos metálicos. Consiste en una bobina situada junto a un imán permanente. En condiciones estáticas no hay ningún movimiento en las líneas de flujo y no se induce ninguna corriente en la bobina. Cuando un objeto metálico penetra en el campo del imán o lo abandona, el cambio resultante en las líneas de flujo induce un impulso de corriente, cuya amplitud es proporcional a la velocidad del cambio del flujo como se muestra en la Figura 2.13[17].

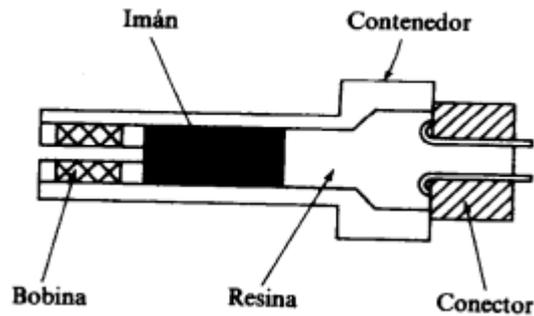


Figura 2.13: Sensor inductivo.

Sensores de efecto Hall

Modificación de un campo magnético por presencia de objetos metálicos. El efecto Hall relaciona la tensión entre dos puntos de un material conductor o semiconductor con un campo magnético a través de un material(Figura 2.14)[17].

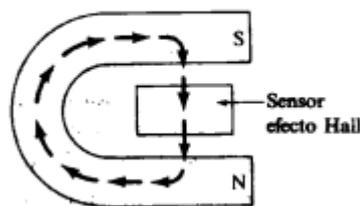


Figura 2.14: Efecto Hall.

Sensores capacitivos

Modificación de la capacidad de un condensador por presencia de objetos sólido.

El elemento sensor es un condensador constituido por un electrodo sensible y un electrodo de referencia separados por un dieléctrico, una cavidad de aire seco para aislar y un conjunto de circuitos electrónicos como se observa en la Figura 2.15[17].

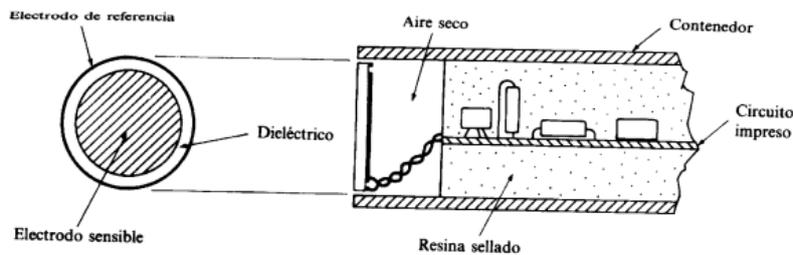


Figura 2.15: Sensor capacitivo.

Sensores ultrasónicos

Modificación de la distancia de objetos mediante la detección de ecos de ultrasonidos. Las ondas ultrasónicas tienen la capacidad de que cuando viajan por un medio cualquiera son reflejadas si encuentran en su camino una discontinuidad o algún elemento extraño[17].

2.3.5 Herramienta del robot

En particular, el número de pinzas en un robot puede tener un impacto sustancial en su capacidad. Una pinza es un componente de un robot que contiene partes para procesar mientras el robot realiza operaciones de manejo, como transportar una parte o cargar una máquina con una parte. La cantidad de pinzas que tiene un robot determina la cantidad de piezas que puede manejar el robot al mismo tiempo. En este estudio, tenemos m máquinas idénticas (excepto las entradas y los buffers de salida) que tienen un diseño de celda robótica en línea. No hay áreas intermedias entre las máquinas. Cada una de las partes es idéntica y hay varias operaciones que deben realizar las máquinas. Cada máquina también es idéntica y lo suficientemente flexible para realizar todas las operaciones requeridas por las partes. Hay un robot de doble agarre que carga y descarga las máquinas y que transporta las piezas entre las máquinas. La función de pinza doble proporciona a los robots la capacidad de usar ambas pinzas mientras se cargan / descargan las máquinas y transportan las piezas. Se supone que el robot es capaz de cambiar sus pinzas mientras viaja entre las máquinas[18].

Los dispositivos de movimiento imitan los movimientos de las personas; en el caso de la pinza, imitan los de los dedos. Una pinza es un dispositivo que sostiene un objeto de modo que se pueda manipular. Tiene la capacidad de retener y liberar un objeto mientras se ejecuta alguna acción. Los dedos no son parte de la pinza; son herramientas a la medida especializado que se usa para sujetar el objeto y se conocen como "mordazas".

Operación

La pinza usada más ampliamente es la pinza de accionamiento neumático; básicamente es un cilindro que funciona con aire comprimido. Cuando se suministra aire, las mordazas de la pinza se cerrarán sobre un objeto y lo sostendrán firmemente mientras

se ejecuta una operación, o cuando la dirección del aire cambia, la pinza liberará el objeto. Los usos típicos son cambiar la orientación o mover un objeto como en una operación de tipo "recoger y colocar"[19].

Acción de sujeción

Externa:

Éste es el método más popular de sujetar objetos; es el más simple y requiere la longitud de carrera más corta. Cuando se cierran las mordazas de la pinza, la fuerza de cierre de la pinza sujeta ese objeto[19].

Interna:

En algunas aplicaciones, la geometría del objeto o la necesidad de acceder al exterior del objeto exigirán que el objeto se sostenga desde el centro. En este caso la fuerza de apertura de la pinza estará sosteniendo el objeto (Figura 2.16) [19].

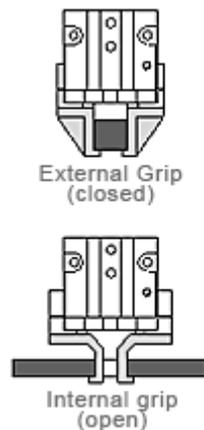


Figura 2.16: Acción de sujeción.

Tipos de pinzas neumáticas

Los tipos más populares de pinzas neumáticas son los estilos de sujetador paralelo de dos mordazas y el angular de dos mordazas. Las pinzas paralelas se abren y cierran paralelos al objeto que van a sostener; estos son las pinzas usados más ampliamente. Son los más sencillos de fabricar y pueden compensar algo de variación dimensional. Las pinzas angulares mueven las mordazas de una manera radial para hacer girar las mordazas y alejarlas del objeto y por lo tanto necesitan más espacio como se muestra en la Figura 2.17[19].

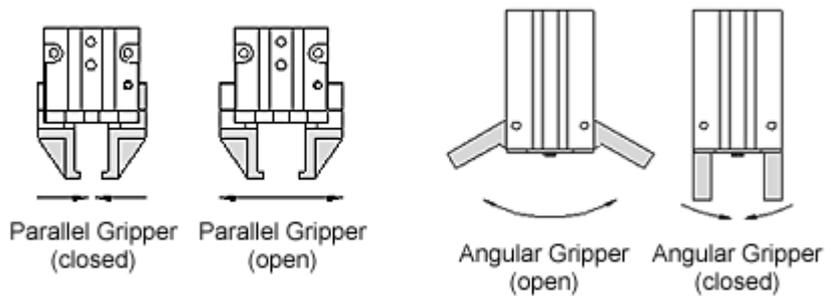


Figura 2.17: Tipo de pinzas.

Hay dos tipos de acciones de sujeción:

Fricción:

Las mordazas de sujeción por fricción confían completamente en la fuerza de la pinza para sostener el objeto; son las más fáciles de fabricar y pueden requerir más fuerza para sostener el objeto. Esto es especialmente cierto para los objetos que no tienen superficies planas. Las fuerzas aplicadas desde cualquier dirección pueden desplazar las partes[19].

Retención o rodeo:

Las mordazas de sujeción de retención o rodeo sostendrán el objeto y lo acunarán en las mordazas. Es el método preferido porque agrega estabilidad a la retención del objeto y requieren menos fuerza para sostener el objeto; para dejar caer el objeto se debe superar la fuerza para abrir las mordazas. Tenga en mente que es posible que sea necesario incrementar la longitud de carrera de la pinza para rodear al objeto[19].

2.3.6 Tablero de control

Un tablero eléctrico de automatización es aquel que está constituido por equipos electromagnéticos, tales como relés auxiliares, contadores, temporizadores electrónicos, temporizadores neumáticos, etc[20].

Su función es albergar diferentes dispositivos eléctricos, electrónicos, etc. que gobiernen la lógica y energicen cargas, tales como motores, generadores, máquinas de procesos, etc., o sea, todo aquello que necesite la industria para controlar el funcionamiento de las máquinas[20].

2.3.7 Interfaz hombre máquina.

Una interfaz de usuario asistida por ordenador, actualmente una interfaz de uso, también conocida como interfaz hombre-máquina (IHM), forma parte del programa informático que se comunica con el usuario. En ISO 9241-110, el término interfaz de usuario se define como "todas las partes de un sistema interactivo (software o hardware)

que proporcionan la información y el control necesarios para que el usuario lleve a cabo una tarea con el sistema interactivo"[21].

También conocidas como *displays*, pantallas de operador o simplemente HMI (por sus siglas en inglés), las interfaces Hombre Máquina han pasado de ser simples elementos de comunicación entre el operario y su proceso para transformarse en componentes inteligentes de control y monitoreo. La nueva generación de HMI integra prestaciones que anteriormente sólo encontrábamos en plataformas dedicadas al control y automatización como PLCs[22].



Figura 2.18: Imagen de un HMI.

En cualquier proceso industrial, es casi inevitable encontrar, al menos, una interfaz Hombre Máquina (Human-Machine Interface, HMI) que ayude a los operarios a monitorear y controlar el funcionamiento de un equipo. Hasta la llegada de estas, los operarios, personal de mantenimiento y gerentes, sólo podían interactuar con sus procesos industriales a través de una serie de botones y luces piloto. Al tratarse de equipos de bajos grados de complejidad, dicha alternativa era aceptable, pero cuando se busca supervisar y modificar los parámetros de un proceso que posee diversas velocidades, materiales, equipos, recetas y procedimientos, entre otras variables, la versatilidad y capacidades gráficas de las pantallas HMI, las transforman en el elemento preferido para llevar a cabo estas tareas[22].

2.4 Redes industriales

Con el objetivo de realizar la sincronización de los robots, hay que entender que en cualquier proceso de automatización industrial se requiere el uso de algún tipo de comunicación entre los elementos es por ello que se hará una explicación de las comunicaciones industriales más comunes.

En principio una red se puede definir como una serie de estaciones (Nodos) o equipos interconectados entre sí, para tener información más común disponible en uno, varios o cada uno de los dispositivos de red.

Por tanto, las redes industriales son redes conformadas por equipos de control, tales como[22]:

- PC's Industriales.
- Controladores
- Sistemas de Control Distribuido.
- Transductores y Actuadores.
- Módulos Inteligentes.
- Interfaces de Operador.

Entre los conceptos básicos manejados en las terminologías de redes se pueden encontrar[22]:

Nodo

Punto de conexión en una red que permite llamar a una estación de la red, generalmente contiene una dirección.

Capa física

Configuración de cables y módulos de interface que proveen un canal para comunicación entre nodos (Enlace físico).

Protocolo

Grupo de reglas de programación para interpretar las señales transmitidas sobre un enlace físico.

Iniciador

Nodo en la red capaz de actuar como maestro. Cuando el iniciador tiene el turno puede enviar mensajes y solicitar respuesta de cualquier nodo del enlace de datos.

Contestador

Nodo que actúa como dispositivo esclavo. No es capaz de iniciar comunicaciones, sólo puede enviar mensajes en respuesta al requerimiento de un iniciador.

Enlace de datos

Es el grupo de dispositivos conectados al cable de comunicaciones que permite el intercambio de información.

Token

Derecho de la lógica a iniciar comunicaciones. Es una red multimaestro se pasa un turno simple entre iniciadores para asegurarse de que dos nodos no transmitan al mismo tiempo.

Red multimaestro

Una red en la que más de un nodo puede iniciar comunicaciones e inicializar el enlace.

Acoplador de enlace

Es un dispositivo de hardware que se conecta al cable de comunicación. El acoplador de enlace proporciona una conexión en enlace eléctricamente aislada al procesador del PLC o de una estación programadora.

Nivel de entrada/Salida

Es el nivel más bajo de la red donde se conectan los dispositivos de adquisición de los datos en campo tales como: Sensores, Interfaces de operador, electroválvulas, controladores, etc.

Nivel de control

Protocolos que permiten conectar los elementos que realizan el control en la industria, tales como PLC's, Sistemas de control distribuidos básicos (DCS's) y algunos PC's industriales usados para la ejecutar el control del proceso exclusivamente.

Nivel de gestion

Este nivel se conoce como nivel de Información, en donde se conectan directamente DCS's, Algunos PLC's con procesadores avanzados y estaciones de trabajo para realizar el control supervisorio del proceso. Este nivel maneja protocolos de comunicaciones estándares, tales como Ethernet, a diferencia de los niveles anteriores en donde los protocolos de red son propietarios, requiriéndose en la mayoría de las aplicaciones interfaces adicionales.

Las redes industriales se pueden dividir básicamente en tres niveles, los cuales se muestran en la figura 2.19.



Figura 2.19: Clasificación de las redes industriales.

Ethernet Industrial

Ethernet es un estándar que especifica la construcción y funciones de redes abiertas para transmisión de datos accesibles según el proceso CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) ampliamente utilizado en el ambiente de oficinas. Debido a la creciente necesidad de comunicaciones en el medio de la industria muchos fabricantes han respondido al llamado y han propuesto una plataforma ampliamente probada, que con algunas modificaciones se ha ajustado a las necesidades de la industria[22].

Los equipos para Ethernet industrial están diseñados para operar en ambientes de planta cumpliendo o excediendo las comunicaciones de los equipos que interconectan tales como PLC, HMI y robots, entre otros[22].

Como principales ventajas de Ethernet Industrial pueden enumerarse:

- Reducción del costo del hardware
- Amplia selección de medios de transmisión: cobre, fibra óptica e inalámbrico.
- Altas velocidades de transmisión de datos 10 y 100Mbps y 1 y 10Gbps.
- Provee una infraestructura de red sin fracturas, desde el nivel corporativo hasta el nivel de planta donde se ubican sensores y actuadores.
- La mayoría de los fabricantes de soluciones para buses de campo, han desarrollado protocolos propios basados en Ethernet (como Ethernet/IP, Modbus/TCP, Profinet, entre otros).

Otros de los beneficios que más le interesan a la industria son el costo y el tiempo de instalación, los cuales se ven reducidos significativamente comparados con cualquier otra tecnología del tipo. También el tiempo de arranque de una planta se reduce debido a la sencillez de esta red.

Un switch es un dispositivo de propósito especial diseñado para resolver problemas de rendimiento en la red, debido a anchos de banda pequeños y embotellamientos. El switch puede agregar mayor ancho de banda, acelerar la salida de paquetes, reducir tiempo de espera y bajar el costo por puerto[21].

Opera en la capa 2 del modelo OSI y reenvía los paquetes en base a la dirección MAC.

El switch segmenta económicamente la red dentro de pequeños dominios de colisiones, obteniendo un alto porcentaje de ancho de banda para cada estación final. No están diseñados con el propósito principal de un control íntimo sobre la red o como la fuente última de seguridad, redundancia o manejo[21].

Al segmentar la red en pequeños dominios de colisión, reduce o casi elimina que cada estación compita por el medio, dando a cada una de ellas un ancho de banda comparativamente mayor[21].

Uno de los principales factores que determinan el éxito del diseño de una red, es la habilidad de la red para proporcionar una satisfactoria interacción entre cliente/servidor, pues los usuarios juzgan la red por la confiabilidad del servicio[21].

Hay diversos factores que involucran el incremento de ancho de banda en una LAN[21]:

- El elevado incremento de nodos en la red.
- El continuo desarrollo de procesadores más rápidos y poderosos en estaciones de trabajo y servidores.
- La necesidad inmediata de un nuevo tipo de ancho de banda para aplicaciones intensivas cliente/servidor.

Cultivar la tendencia hacia el desarrollo de granjas centralizadas de servidores para facilitar la administración y reducir el número total de servidores.

La regla tradicional 80/20 del diseño de redes, donde el 80% del tráfico en una LAN permanece local, se invierte con el uso del switch. Los switches resuelven los problemas de anchos de banda al segmentar un dominio de colisiones de una LAN, en pequeños dominios de colisiones[21].

Los usos de los dispositivos para Ethernet deben ser de grado industrial y los cables para la instalación del mismo deben ser STP (Shielded Twisted Pair) para que tengan la protección suficiente contra el ruido eléctrico y electromagnético. Una de las partes más importantes de esta tecnología son los dispositivos de comunicación, en este caso switches Ethernet. Los switches deben ser diseñados para el uso rudo de la industria, las especificaciones de éstos son iguales a cualquier otro dispositivo utilizado para la automatización, teniendo resistencia en el soporte de temperatura, la cantidad de vibración y el shock que puedan soportar. Los switches industriales pueden contar con tecnología SNMP, lo que permite un completo análisis y diagnóstico del tráfico de la red mediante OPC14 de esta manera, desde cada SCADA se puede analizar donde se encuentra el mayor tráfico y donde se encuentra algún cuello de botella.

Protocolos industriales basados en Ethernet

EtherCAT (Ethernet Control Automation Technology). Sistema de alto rendimiento que utiliza protocolos de Ethernet en un entorno industrial. El paquete Ethernet ya no es recibido, interpretado y copiado como proceso de datos en cada conexión, en cambio la trama Ethernet se procesa sobre la marcha: el nuevo desarrollado FMMU (Fieldbus Memory Management Unit), en cada nodo esclavo lee los datos que le ha dirigido, mientras que el telegrama es enviado al siguiente dispositivo, los datos de entrada se añaden al telegrama, mientras que pasa a través, siendo los telegramas solo un retraso de unos nanosegundos[22].

Ethernet/IP. Es una solución abierta estándar para la interconexión y aplicaciones de redes industriales basadas en la normatividad IEEE 802.3 compatible con los protocolos estándar TCP/IP permitiendo el uso de aplicaciones de control con el Protocolo de Control e Información, CIP, para establecer un nivel de protocolo y poder configurar acceder y controlar dispositivos de E/S en tiempo real. Son muchas las ventajas del nivel CIP sobre Ethernet/IP. La oferta de un acceso consistente a aplicaciones físicas significa que se puede utilizar una sola herramienta para configurar dispositivos CIP en distintas redes desde un único punto de acceso sin la necesidad de software propietario, una red Ethernet/ IP utiliza una topología de estrella activa en la que los dispositivos están conectados punto a punto con un conmutador el cual negociará la velocidad de transmisión. La ventaja de esta topología radica en la compatibilidad con productos de 10 y 100Mbps ofreciendo conexiones fáciles de cablear o depurar en las que resulta sencillo detectar fallos y llevar a cabo tareas de mantenimiento[22].

Powerlink. Es un protocolo determinista en tiempo real basado en el estándar Ethernet el objetivo del desarrollo de este protocolo consistió en aplicar la tecnología Ethernet a las aplicaciones de automatización industrial donde varios elementos de

control (PLC, pantallas de operador, módulos de E/S, módulos de seguridad, sensores) tengan que comunicar entre ellos de forma rápida en condiciones de tiempo real adversas garantizando que el proceso de comunicación sea fiable y repetitiva[22].

2.5 Cinemática de Robots

La cinemática es la rama de la física que estudia el movimiento sin considerar las fuerzas o pares que lo causan, es decir, estudia las leyes de movimiento sin tener en cuenta aspectos tales como masas e inercias. Se limita por tanto al estudio de la trayectoria que tiene el robot a lo largo del tiempo, considerando tan solo la posición, la velocidad y en ocasiones la aceleración e incluso su derivada. Por tanto, se trata de una descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo.

La cinemática del robot consiste en estudiar su movimiento con respecto a un sistema de referencia que determina las relaciones entre la posición y orientación del extremo del robot (localización) y los valores de sus coordenadas articulares[23].

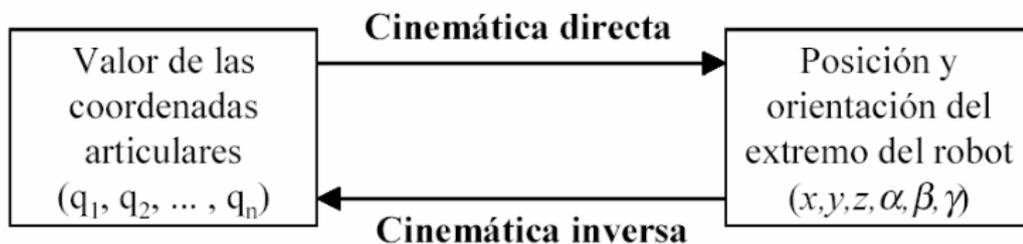


Figura 2.20: Cinemática directa e inversa.

2.5.1 Cinemática directa.

Se conoce como cinemática directa a los modelos matemáticos que permiten calcular la posición de los eslabones de un robot (estructura articulada) a partir de sus componentes fijos y configuración de las articulaciones[23].

La cinemática directa se refiere al uso de ecuaciones cinemáticas para el cálculo de la posición del actuador final (TCP) en un robot articulado a partir de los ángulos y/o desplazamientos de las articulaciones o de la posición y orientación de la base de un robot móvil a partir de las velocidades de las ruedas. De igual forma, otro tipo de robots, también disponen de modelos cinemáticos directos que permiten en última instancia calcular la posición y orientación de determinados elementos del robot a partir de sus variables de actuación (Figura 2.21)[23].

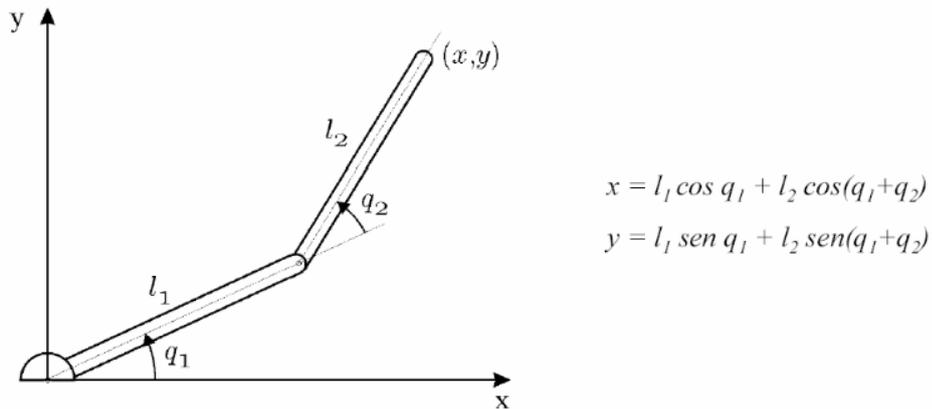


Figura 2.21: Cinemática directa.

2.5.2 Cinemática inversa.

Es el proceso inverso por el cual se obtienen modelos matemáticos que permiten, a partir de una posición específica del actuador final, calcular la posición (ángulos) y/o desplazamientos de los actuadores. Por lo general podemos encontrar configuraciones que no son factibles, es decir, que no son alcanzables, configuraciones singulares que requieren una dirección de movimiento no-homologa o incluso soluciones múltiples, típicamente soluciones de codo arriba o codo abajo en los brazos robots articulados[23].

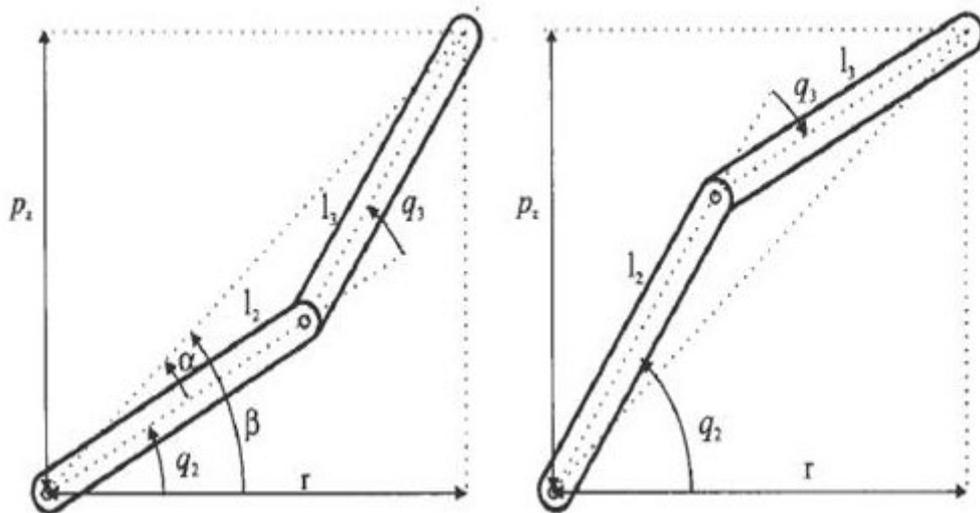


Figura 2.22: Cinemática inversa.

2.5.3 Metodología de Denavit-Hartenberg.

La convención o metodología de Denavit-Hartenberg (DH) permite establecer la ubicación de los sistemas de referencia de los eslabones en los sistemas robóticos articulados, ya sean prismáticas o de revolución, con cadenas cinemáticas abiertas.

Jacques Denavit y Richard Hartenberg introdujeron esta convención en 1955 con el propósito de estandarizar la ubicación de los sistemas de referencia de los eslabones de un robot[23].

Parámetros DH

Se trata de una metodología ampliamente utilizada en el ámbito académico y de investigación en robótica que permite definir las transformaciones relativas entre eslabones con tan solo cuatro parámetros, siendo éste el número mínimo de parámetros para configuraciones genéricas, según se muestra en la siguiente figura:

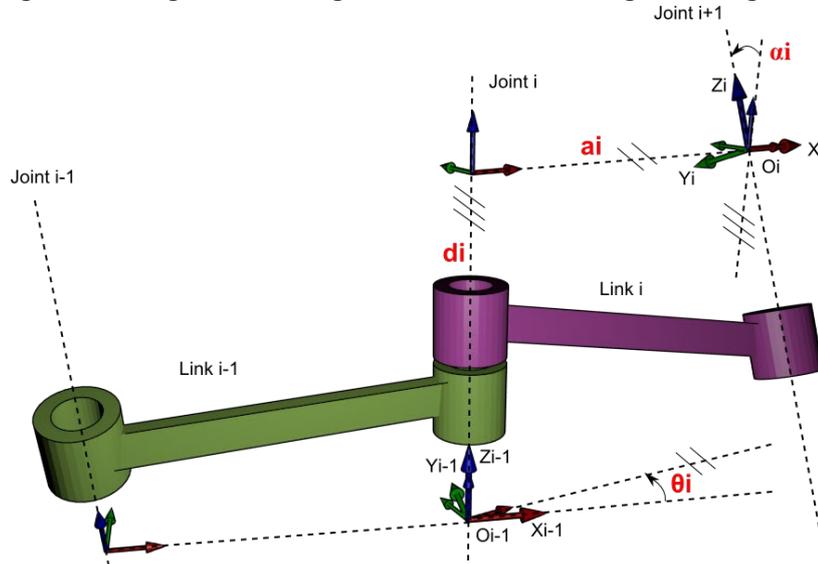


Figura 2.22: Parametros DH.

Los pasos del algoritmo genérico para la obtención de los parámetros DH se detallan a continuación[23]:

- Numerar los eslabones: se llamará eslabón a la "base", o base fija donde se ancla el robot.
- Numerar las articulaciones: La articulación corresponderá al primer grado de libertad, y la articulación al último.
- Localizar el eje de cada articulación: Para pares de revolución, será el eje de giro.
- Ejes: Empezamos a colocar los sistemas.
- Sistema de coordenadas: Se sitúa el punto origen En cualquier punto a lo largo de. Resto de sistemas: Se estudiará la relación entre los ejes y teniendo cuatro posibles casos para determinar la normal común entre ambas articulaciones.
- Intersectan: El origen estará ubicado en el punto de intersección.
- Cruzan: El origen estará ubicado en la intersección entre la normal común de los ejes.
- Coincidentes: Podemos posicionar el origen a lo largo del eje y escogemos la normal común en la misma dirección que el caso anterior .

- Sistema del extremo del robot: El n -ésimo sistema se coloca en el extremo del robot, con su eje paralelo.
- La orientación de e puede ser arbitraria, siempre que se respete evidentemente que sea un sistema dextrógiro (regla de la mano derecha).
- Ejes: Cada e_i va en la dirección de la normal común a e_{i-1} y e_{i+1} . El sentido del eje es indistinto, pudiendo escoger un sentido coincidente al de la normal común o el sentido contrario.
- Ejes: Se colocan para que los ejes e_i formen un sistema dextrógiro (regla de la mano derecha).

2.6 Conclusión

En este capítulo se realizó una descripción de los elementos básicos en una celda robótica, explicando los conceptos de cada uno de ellos.

Además, se concluyó que para llevar a cabo la sincronización entre los elementos de la celda robótica se concluye que con el control secuencial utilizando programación binaria ya que es el más fácil y adecuado para aplicaciones industriales donde se utilizara un PLC.

Capítulo III. Propuesta de solución.

3.1 Prototipo

Para poder realizar la celda robótica y la sincronización de los robots es necesario programar cada elemento y que un controlador central controle cada movimiento para obtener un registro de estos, en la figura 3.1 se puede observar como un programa de PLC en un sistema de control interpreta las salidas y las entradas de los diferentes elementos.

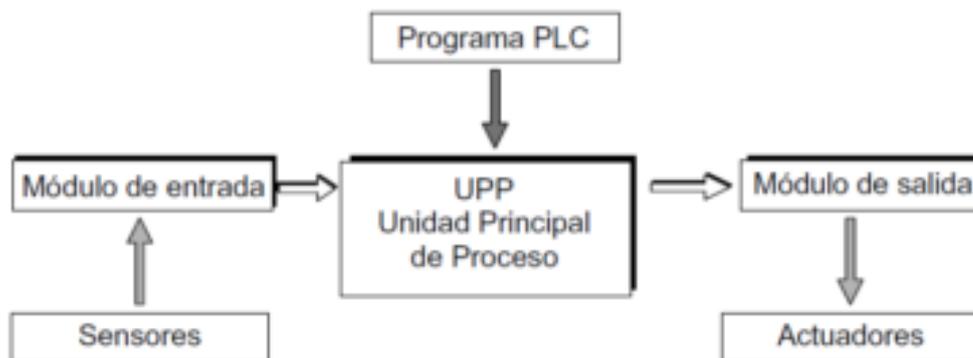


Figura 3.1: Sistema de control con PLC.

En este capítulo se mostrará cómo se van sustituyendo cada de uno de esos elementos por lo de la celda robótica además de sus características para tener una mejor comprensión.

En la figura 3.4 se muestra un diagrama a bloques general de la celda robótica en el encuentran los dos robots con retroalimentación al controlador y la banda transportadora con la misma comunicación.

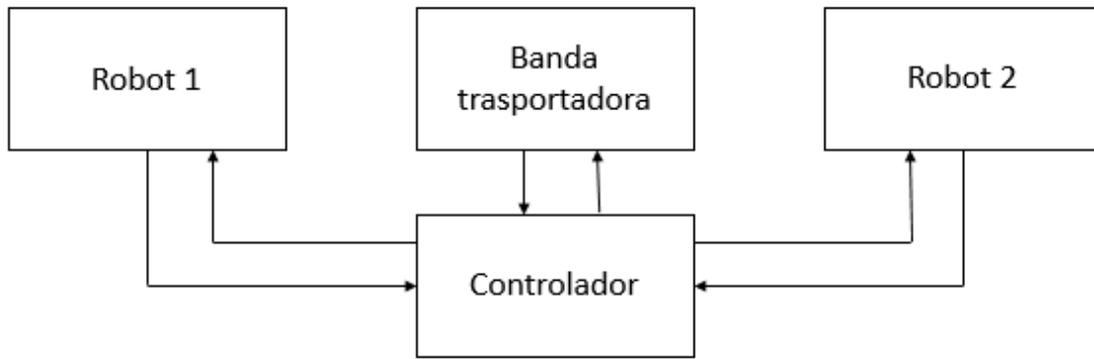


Figura 3.2: Diagrama general del sistema.

Con el fin de comprobar la sincronización de los robots se realizará un proceso sencillo que consiste en que el Robot 1 levante una caja de una mesa y la coloque en la banda transportadora, la banda la va mover al Robot 2 y va simular un proceso de soldadura, ya que termine la banda regresara la caja a la posición inicial y el Robot 1 la regresara a la mesa.

3.2 Diseño de la celda robótica.

Los elementos que se eligieron para la celda robótica son los mostrados en la figura 3.5, se hará una descripción detallada de cada uno de ellos, la comunicación que se utilizo fue por medio de Ethernet/IP por las grandes ventajas que maneja con respecto a otro tipo de comunicaciones y del PLC a los robots fue cableada ya que no se consiguieron los módulos para poder conectarlo a la red.

La red EtherNet/IP proporciona sistemas de red a nivel de toda la planta con el uso de tecnologías de conexión en red abiertas y estándar del sector. Permite control e información en tiempo real en aplicaciones discretas y de proceso continuo, lotes, seguridad, variadores, movimiento y alta disponibilidad. La red EtherNet/IP conecta dispositivos tales como arrancadores de motor y sensores a controladores, dispositivos HMI, entre otros, en la empresa. Admite comunicaciones no industriales e industriales en una infraestructura de red común[24].

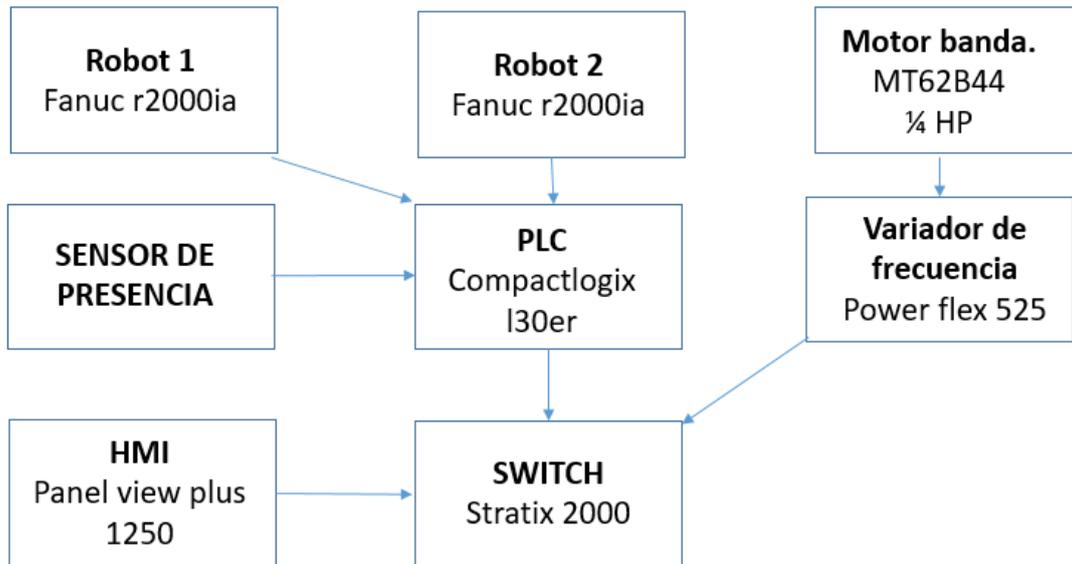


Figura 3.3: Componentes de la celda robótica.

3.2.1 Fanuc R-2000IA

El robot utilizado en la celda es el FANUC R-2000iA / 210F es un robot industrial de trabajo pesado de seis ejes fabricado para una variedad de aplicaciones tales como soldadura por puntos, transferencia de piezas, eliminación de material y dispensación. Este robot proporciona servo accionamientos confiables para proporcionar el mayor tiempo de actividad y productividad. Puede esperar resultados inmediatos una vez que FANUC R-2000iA / 210F está en una línea de producción.

El diseño de perfil delgado de la R-2000iA / 210F le permite trabajar en espacios reducidos y, a la vez, puede manejar una carga útil de hasta 210 kg. Esto también ayuda a minimizar la interferencia con los periféricos del sistema. Además, el brazo exterior estacionario simplifica el vendaje del cable y la manguera para mejorar aún más la vida útil. La gran envolvente de trabajo de la R-2000iA / 210F permite que el robot llegue arriba y atrás.

Los robots que se donaron por la empresa Ford son de la serie R-2000iA / 210F, en la figura 3.2 se muestra el aspecto físico del robot.



Figura 3.4: Robot Fanuc R2000IA.

La serie R-2000iA es FANUC, de seis ejes, carga pesada, alto rendimiento en la familia de robots industriales. El R-2000iA proporciona mayor valor a través de mejoras rendimiento, fiabilidad y mantenibilidad. En la figura 3.5 se muestra el sistema R-J3iB que tiene la siguientes características:[25].



Figura 3.5: Sistema R-J3Ib.

El R-2000iA, es utilizado para para:

- Soldadura por puntos automotriz.
- Aplicaciones industriales generales.
- Transferencia de piezas.
- Eliminación de material.
- Carga de maquinaria.
- Características.

Mecánicas:

- Gran sobre de trabajo con capacidad para llegar arriba y detrás.
- Diseño de perfil delgado.

- Reductores verticales para todos los ejes.
- La eliminación del contrapeso aumenta el espacio de trabajo disponible.
- Cables de proceso / aplicaciones cableadas a través del brazo.
- Sin motores en la muñeca.

Control:

- Armario de tamaño B.
- Amplificador de cambio rápido.
- Tiempo de arranque rápido <30 s.
- Distribución de software PCMCIA.
- Conexiones fáciles a una variedad de E / S.
- Colgante de enseñanza de color para una programación aún más sencilla y un diseño de interfaz de usuario de celda personalizada.

Los componentes básicos del robot son:

- La estructura mecánica (los eslabones, base, etc). Esto exige mucha masa, para proporcionar la rigidez bastante estructural para asegurar la exactitud mínima bajo las cargas útiles variadas.
- Actuadores: Los motores, los cilindros, las juntas del robot. Rsto también podría incluir los mecanismos para la transmisión.
- Control a la computadora. Esta computadora une al usuario con el robot.
- El extremo del brazo que labora con herramienta. La programación que proporciona el usuario se diseña para las tareas específicas.

Terminal de enseñanza del robot.

La terminal de enseñanza (teach pendal) es un dispositivo de interface con el que el operador visualiza los menús del software. Se encuentra conectado al controlador por medio de un cable que se conecta a la tarjeta principal, es de tipo desconectable, a continuación, en la figura 3.6 se muestra la imagen de este[26]:



Figura 3.6: Teach pendal.

3.2.2 CompactLogix L30ER

El controlador que se utilizo es el COMPACTLOGIX L30ER (Figura 3.7) con un módulo de salidas digitales, otro de entradas digitales y otro con salidas de relay con las siguientes características:

- Compatibilidad con movimiento integrado en Ethernet/IP
- Compatibilidad para topologías de red en anillo a nivel de dispositivos
- Almacenamiento de energía incorporado que elimina la necesidad de baterías de litio
- Acepta la reutilización de las E/S 1769 existentes
- Tarjeta Secure Digital (SD) de 1 GB extraíble que mejora la integridad de los datos
- Opciones flexibles de memoria de hasta 3 MB
- Características adicionales para ambientes peligrosos (versión NSE)
- Control de movimiento integrado en Ethernet/IP
- Acepta hasta 16 ejes de movimiento integrado

El cuál es el encargado de controlar toda la celda robótica y es compatible con Ethernet ip.

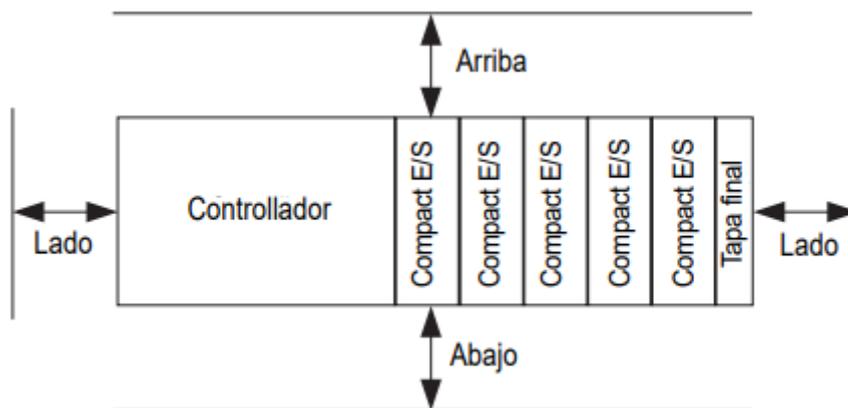


Figura 3.7: Rack de la familia CompactLogix.

Se cuenta con las siguientes tarjetas:

En el primer *Slot* (espacio) del PLC se colocó un módulo de salida en estado sólido de 24 volts con la serie 1769-OV16 (Figura 3.8).

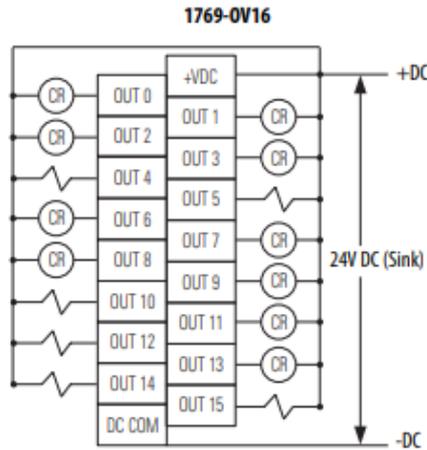


Figura 3.8: Tarjeta 1769-OV16.

En el segundo slot se utilizó un módulo de entrada Compact™ 1769-IQ16 Módulo de entradas 24 V c.c. drenador/surtidor (Figura 3.9).

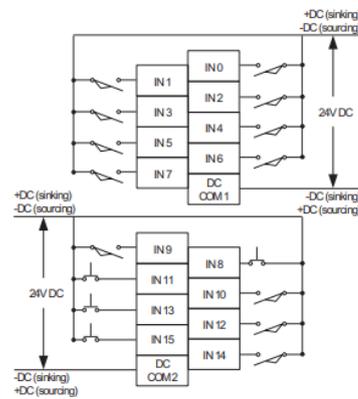


Figura 3.9: Tarjeta 1769-IQ16.

En el Slot 3 se colocó la fuente de alimentación 1769-PA4 para poder alimentar el PLC con 120 VCA esta otorga ocho espacios para colocar más módulos (Figura 3.10).

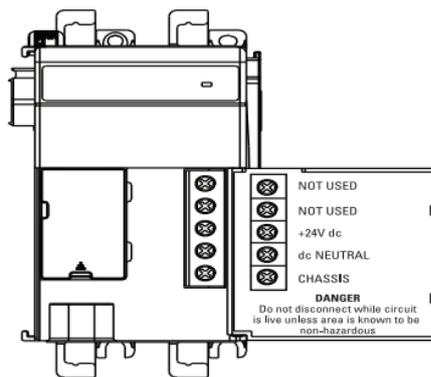


Figura 3.10: Fuente de alimentación 1769-PA4.

Y en el cuarto slot se colocó Módulo de salida de relé de CA/CC de 16 salidas con la serie 1769-OW16(Figura 3.11).

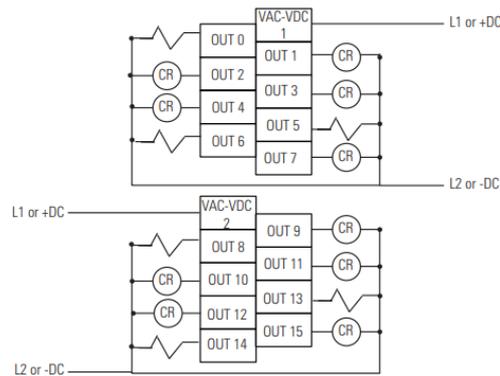


Figura 3.11: Tarjeta 1769-OW16.

3.2.3 Switch Stratix 2000

Se optó por comunicar los elementos del sistema por medio de Ethernet/Ip con un switch Stratix 2000 (Figura 3.12) porque tiene 8 puertos de comunicación lo necesario para nuestra aplicación además los robots no se conectan a este.

Las ventajas de los switch stratix:

Son ideales para redes pequeñas de control. Estos interruptores aptos para la industria no requieren configuración y usan conexiones de cable simples para una conexión sencilla con controladores basados en Logix.

- Ofrece una solución compacta y de bajo costo
- Incluye la capacidad para negociar automáticamente los ajustes de velocidad y duplex
- Opera con alimentación eléctrica de 20 VCA o 24 VCC
- Incluye detección automática de cruce de cables



Figura 3.12: Switch Stratix 2000.

3.2.3 Panel View Plus 1250

Se utilizó un panel view plus 1250 (Figura 3.13) con su software FactoryTalk® View Machine Edition. Estos terminales ofrecen conectividad Ethernet/IP.

- Utiliza las funciones estándar de Windows CE 6.0 y los gráficos a colores de 18 bits de pantalla LCD de TFT a color
- Monitorea las aplicaciones desde una ubicación remota con conectividad VNC
- Usa una tarjeta SD para copiar y restaurar rápidamente la interface de operador
- Incluye capacidades de notificación a través de mensajes de texto y correo electrónico
- Incluye RAM de 512 MB y almacenamiento no volátil de 512 MB (aproximadamente 80 MB de memoria libre para usuarios).



Figura 3.13: Panel View Plus 1250.

3.2.4 Powerflex 525

Con el fin de controlar la banda transportadora se utilizó un variador de velocidad powerflex 525 (Figura 3.14) con un se utiliza un motor de ¼ HP a 220 Vac de tres fases con las siguientes características:

El variador de CA PowerFlex 525 que ofrece una comunicación EtherNet/IP™ compatible con los demás equipos en la celda asimismo se puede programación USB y características de seguridad estándar incorporadas, ofrece alimentación eléctrica de 0.4 a 22 kW (0.5 a 30 Hp) con voltaje de entrada de 100 a 600 V, por otra parte funciona a

temperaturas de hasta 70 °C (158 °F) y en el laboratorio donde se encuentran la celda tiene poca ventilación.[24].



Figura 3.14: PowerFlex 525.

3.2.6 Diseño de *gripper*(pinza)

Se diseñó una herramienta de pinza para el robot número uno de tipo paralela, esta ejecuta la tarea de levantar un objeto y subirlo a la banda transportadora utilizando un pistón de doble efecto de la marca SMC modelo CP95P (Figura 3.15), este controlado por una



Figura 3.15: Piston SMC modelo CP95P.

electroválvula de la marca SMC modelo: VFS2120-5DZ-02 (Figura 3.16) de 5 vías para abrir y cerrar la herramienta, se utilizó tubería neumática de 6 mm para las conexiones.



Figura 3.16: Electroválvula VFS2120-5DZ-02.

Se creó una estructura de metal (Figura 3.17) para el diseño de la herramienta para poder sostener objetos.



Figura 3.17: Herramienta completa.

Adicionalmente para el accionamiento del pistón se utilizó un compresor para generar el efecto neumático como se muestra en la Figura 3.18.



Figura 3.18: Compresor.

3.2.7 Banda transportadora

En la construcción de la banda transportadora se utilizó P.T.R. (Perfil tubular rectangular) para la estructura de la banda, la parte donde se encuentran los rodillos se utilizó aluminio ya que la banda ya estaba armada y se restauró de otro proyecto, termino como se muestra en la Figura 3.19



Figura 3.19: Banda transportadora.

3.2.8 Tablero de control

En la construcción del tablero de control se usó riel din de 35mm, y canaleta de 20mmx10mm y el gabinete (Figura 3.20) fue de la marca Hoffman con una medida de 800mmx800mmx300mm, además se le coloco una base con 4 ruedas para moverlo de lugar en caso de ser necesario, esta se construyó con P.T.R.



Figura 3.20: Gabinete.

3.2.6 Modelo cinemático del robot Fanuc R-2000IA

En el capítulo II se describió la importancia de tener el análisis cinemático de un robot, para poder generar un óptimo efecto en el final del robot o en la herramienta y conseguir una trayectoria precisa en cada movimiento y con suavidad en velocidad y posición, en este apartado se muestra la realización de dicho análisis al robot Fanuc R-2000IA.

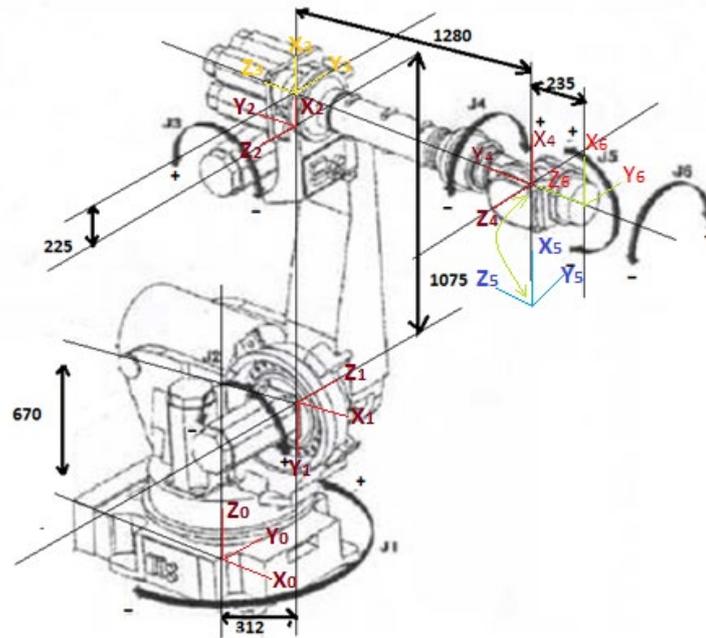


Figura 3.21: Esquema de Robot Fanuc R2000ia 210f

A continuación, se procede a realizar los cálculos correspondientes al modelo cinemático del manipulador guiándonos de la Figura 3.21 donde están las medidas reales del robot.

Cinemática del Robot

Para la obtención del modelo cinemático se ha considerado el método de Denavit-Hartenberg estándar cuyos parámetros se indican en la Tabla 3.1

Articulación i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	j_1	670	312	-90°
2	$j_2 - 90^\circ$	0	1075	180°
3	j_3	0	225	-90°
4	j_4	-1280	0	90°
5	j_5	0	0	-90°
6	j_6	-235	0	0

Tabla 3.1: Parámetros DH del robot Fanuc R2000IA.

Ahora calculamos las matrices ${}^{i-1}A_i$ entre la base ($i=0$) y cada una de las articulaciones hasta llegar al extremo.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 302*C_1 \\ S_1 & 0 & C_1 & 320*S_1 \\ 0 & -1 & 0 & 670 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} S_2 & -C_2 & 0 & 1075*S_2 \\ -C_2 & -S_2 & 0 & -1075*C_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & -S_3 & 225*C_3 \\ S_3 & 0 & C_3 & 225*S_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1280 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & -S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & C_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -235 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrices 1

Al multiplicar las matrices para obtener el comportamiento de la base al extremo del Robot tenemos:

$${}^0A_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz 2 matriz de la base al extremo del robot

Donde

$$n_x = -C_4S_{16} - C_{12}S_{346} + C_{13}S_{246} - C_{1(2-3)6}S_5 + C_{56}S_{14} + C_{12456}S_3 - C_{13456}S_2 \quad (3.1)$$

$$n_y = S_6C_{14} + C_2S_{1346} - C_3S_{1246} - S_{15}C_{(2-3)6} - C_{156}S_4 + C_{2456}S_{13} - C_{3456}S_{12} \quad (3.2)$$

$$n_z = S_{(2-3)5}C_6 - S_{46}C_{(2-3)} + C_{456(2-3)} \quad (3.3)$$

$$o_x = S_{56}C_{1(2-3)} + C_5S_{46} + C_{1245}S_{36} - C_{1345}S_{26} - C_{46}S_1 - C_{126}S_{34} + C_{136}S_{24} \quad (3.4)$$

$$o_y = C_{146} + C_{26}S_{134} - C_{36}S_{124} + S_{156}C_{(2-3)} - C_{15}S_{46} + C_{245}S_{136} - C_{345}S_{126} \quad (3.5)$$

$$o_z = -S_4C_{(2-3)6} - S_{(2-3)56} - S_6C_{(2-3)45} \quad (3.6)$$

$$a_x = S_{145} - C_{1(2-3)5} + C_{124}S_{35} - C_{134}S_{25} \quad (3.7)$$

$$a_y = C_{24}S_{135} - C_1S_{45} - C_{51}C_{(2-3)} - C_{34}S_{125} \quad (3.8)$$

$$a_z = S_{(2-3)5}C_6 - S_5C_{(2-3)4} \quad (3.9)$$

$$P_x=312(C_1)+1075(C_1S_2)+1280(C_{123}+C_1S_{23}) + 225(C_{13}S_2-C_{12}S_3) + 235(C_{15(2-3)}-S_{145}-C_{124}S_{35}+C_{134}S_{25}) \quad (3.10)$$

$$P_y=312(S_1)+1075(S_{12})+235(S_1C_{(2-3)5}+C_1S_{45}-C_{24}S_{135}+C_{34}S_{125}) -225(C_2S_{13}+C_3S_{12})+ 1280(S_{123}+C_{23}S_1) \quad (3.11)$$

$$P_z= 1075(C_2)+1280(C_2S_3-C_3S_2)+225(S_{23})+235(S_5C_{(2-3)4}-S_{(2-3)}C_5+C_{23})+670 \quad (3.12)$$

3.3 Desarrollo del Prototipo.

3.3.1 Tipos de movimiento de robot Fanuc.

Joint

En el sistema de coordenadas específicas JOINT, cada eje puede desplazarse en forma individual, en dirección positiva o negativa del eje. Se puede mover ejes simultáneamente[27].

Hay que utilizar las teclas de movimiento como J1, J2, J3, J4, J5, J6[27].

Cartesianas: XYZ WORLD

El sistema de coordenadas WORLD es un sistema de coordenadas cartesianas, tridimensional, estático, universal, cuyo origen, se encuentra en un punto conceptual, no físico, sobre cada unidad mecánica. Es un sistema definido por el propio software. Es origen para todo movimiento cartesiano. Viene definido de fábrica. Es fijo e inamovible[27].

Al mover el robot, éste se mueve y gira el TCP sobre las direcciones y sentidos del sistema de coordenadas World (propio del robot)[27].

El robot moverá todos sus ejes para mantener la linealidad del TCP de la herramienta.

Cartesianas: XYZ USER

El sistema de coordenadas USER es un sistema de coordenadas cartesianas, cuyo origen viene definido por el usuario. Se disponen de 9 sistemas de coordenadas USER programables[27].

Es muy útil cuando se programa en casa del integrador, se desmonta la célula y se monta nuevamente en casa del cliente[27].

Mientras no se seleccione ninguno se toma por defecto el valor del USER que no es otro que WORLD. Si aun siendo seleccionado alguno de los 9, éste no es configurado también coincidirá con WORLD[27].

Cartesianas: XYZ JOGFRM

El sistema de coordenadas JOGFR es un sistema de coordenadas cartesianas cuyo origen viene definido por el usuario. Se utiliza para mover linealmente de manera eficaz el robot respecto de un área de trabajo. A diferencia del USER las coordenadas respecto

del JOGFRM no tienen un significado especial, por eso no se revelan en ningún tipo de pantalla. Se trata de seleccionar la posición más conveniente para definir el sistema de coordenadas de movimiento JOGFR que más adelante nos será de gran utilidad a la hora de mover el robot. Se disponen de 9 sistemas de coordenadas JGFRM programables[27].

Cartesianas: TOOL

El sistema de coordenadas TOOL es un sistema de coordenadas cartesianas, cuyo origen es definible por el usuario y programable, es decir, puede ser móvil[27].

3.3.2 Centro de herramienta (TCP)

El sistema de movimiento regula las características de los movimientos incluyendo la trayectoria aceleración / deceleración, acabado y velocidad del robot[27].

En aplicaciones de robótica el movimiento de un segmento simple es el movimiento del TCP o punto central de la herramienta (TCP =Tool Center Point), desde una posición inicial a una determinada posición de destino. El TCP es el punto de la antorcha en el cual se efectúa la soldadura[27].

Hay tres tipos diferentes de movimiento: lineal, circular y articulado. Se utilizan estos tipos de movimientos para realizar ciertas tareas. Por ejemplo, se utiliza el movimiento lineal si el robot debe moverse en línea recta entre dos posiciones. Se utiliza el movimiento circular cuando las posiciones deben recorrer un arco de circunferencia.

El movimiento articulado es generalmente el tipo de movimiento utilizado para desplazarse cuando no tiene importancia la trayectoria que hace el robot para ir de una posición a otra[27].

Cuando un punto se memoriza en un sistema de coordenadas cartesianas, las coordenadas grabadas son de hecho las del TCP (punto del centro del útil), referenciadas al sistema del usuario elegido (WORLD por defecto)[27].

Por defecto el TCP se encuentra en el centro de la placa del eje 6 del robot[27].

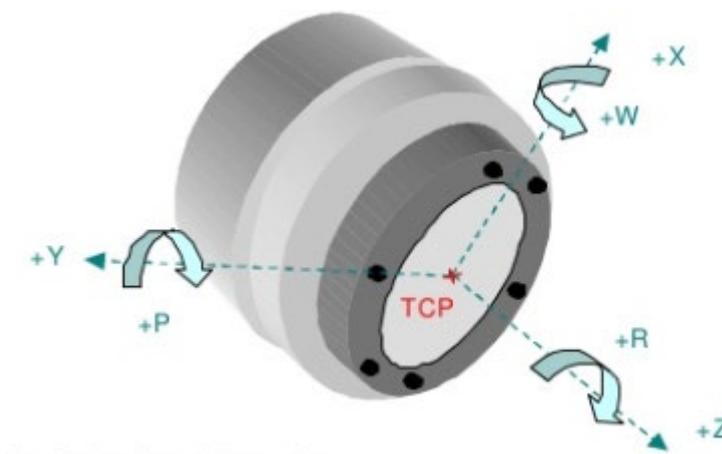


Figura 3.22: Punto TCP en robot.

El TCP es el origen de la referencia herramienta.

La referencia herramienta por defecto está orientada como se describe en la figura de arriba[27].

Cuando se crea una referencia de herramienta, el TCP se desplaza al extremo de la herramienta utilizada. La referencia herramienta puede ser orientada según el eje de ataque de esa herramienta[27].

3.3.3 Configuración de herramienta.

Al robot 1 se le agrego un *gripper*(herramienta) y para modificar en plano del robot se necesita realizar un método para cambiar las coordenadas, el método que se utilizo fue el de 3 puntos además se hicieron configuraciones para comunicarse con la herramienta desde el teach pendal. El procedimiento en este es presionar en orden las siguientes teclas: MENU, SETUP, FRAMES, OTHER.

Seleccionar el marco a editar (JOGFRAME, USERFRAME o TOOLFRAME).

Seleccionar el número de marco que quieres editar con la función DETAILS.

METHOD (Puede ser de 3 puntos para jogframe y userframe, 6 puntos para toolframe. o entrada directa para cualquiera de los frames).

En nuestro caso lo configuramos con el método de los 3 puntos ya que es más sencillo.

El objeto de este método es el de desplazar el TCP al extremo de la herramienta utilizada. Para ello tenemos que marcar un mismo punto con 3 orientaciones diferentes y memorizar esas posiciones[27].

Paso 1:

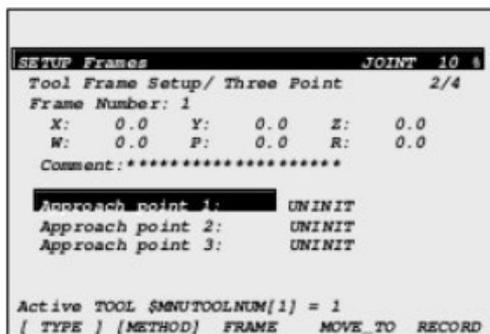


Figura 3.23: Paso 1 método 3 puntos.

Paso 2:

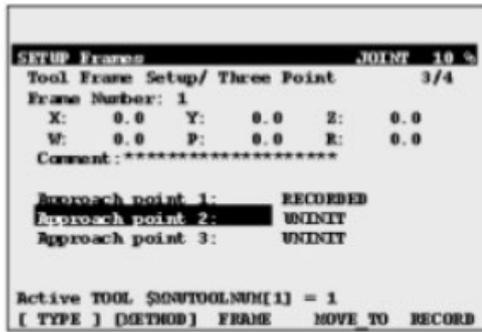


Figura 3.24: Paso 2 método 3 puntos.

Paso 3:

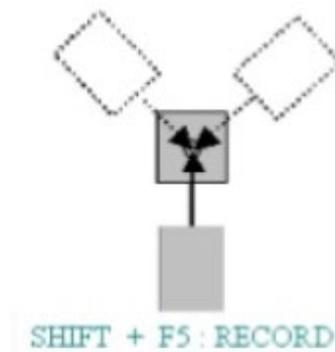
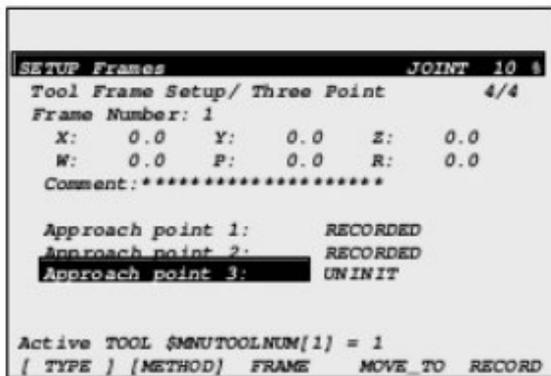


Figura 3.25: Paso 1 método 3 puntos.

Estado final de la ventana:

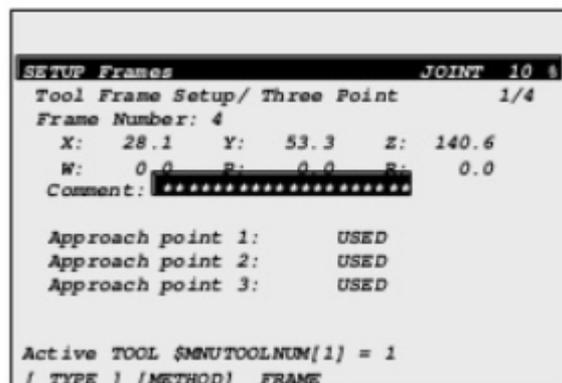


Figura 3.26: Final método 3 puntos.

Como se observa en la siguiente figura ya el plano de referencia del TCP cambio al plano de la herramienta que agregamos.

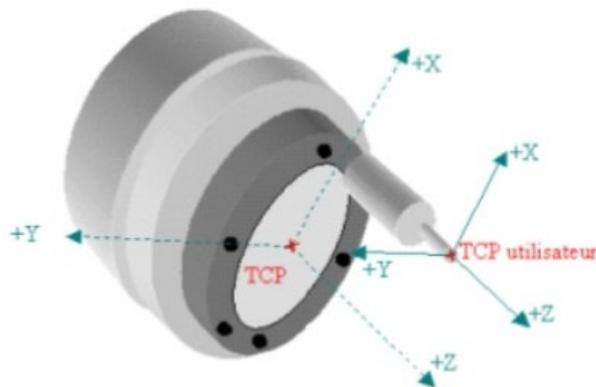


Figura 3.27: Cambio TCP.

Para configurar la herramienta del robot se hizo uso del diagrama eléctrico, el robot cuenta con un conector de salida utilizado para herramientas que se llama end effector y las señales se muestran en las figuras 3.28 y 3.29.



Figura 3.28: Imagen del End Efector.

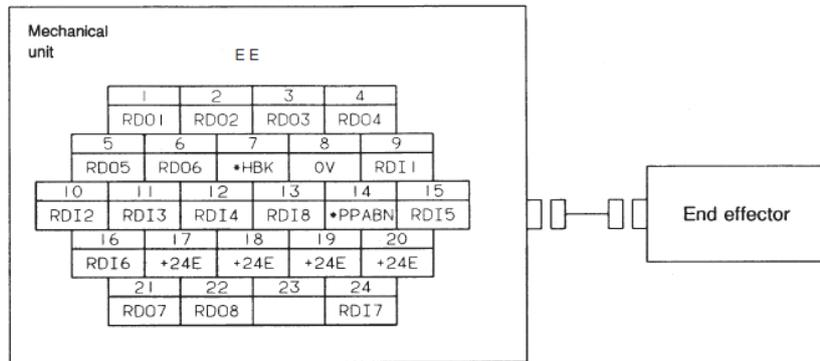


Figura 3.29: Señales en End Efector.

En nuestro caso al abrir o cerrar la herramienta para levantar la caja y utilizamos la salida RD01 en el pin 1 y es una salida NPN que se conectó con con el pin 17 que es una fuente de 24 Volts interna del robot.

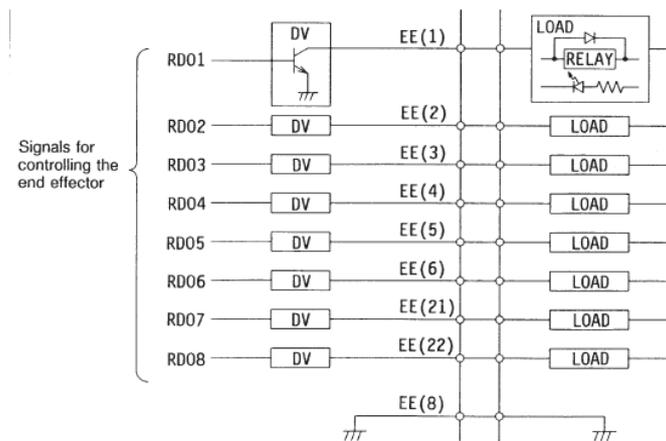


Figura 3.30: Salidas de señales de control en End Efector.

3.3.4 Asignación de Home position y masterización

Home position

A cada robot se le debe asignar una posición de casa (Home position) con el objetivo de tener una posición para iniciar cualquier programa y que regresa a la misma posición al terminarlo, para crearla se necesita hacer uso de los macros, que estos son programas que tienen una serie de instrucciones.

El procedimiento para asignar un home position es el siguiente:

1. MENU
2. SETUP
3. REF POSITION
4. Poner el cursor en la home que deseas configurar (Hay 3 disponibles).
5. DETAIL

6. Poner el nombre del home en el renglón de Comment.
7. Habilitar la home con F4(Enable) en el renglón 2.
8. Seleccionar TRUE con F4 en el renglón de 3 (Valid HOME).
9. Seleccionar el tipo con F4 o F5 y numero de salida que desees activar cuando el robot llegue a home en el renglón Signal definition. Hay dos opciones (DO y RO)
10. Mueve el robot a la posición física donde será la home position. Esta posición deberá ser la misma que grabaste en el registro de posición PR[n] .

Masterizacion

Es la definición de la posición física del robot, sincronizando la información mecánica con la información de posición del robot.

El procedimiento para realizarla es el siguiente:

1. MENU
2. SYSTEM
3. MASTER/CAL. Si esta opción no aparece en el menú, poner un " 1 " a la variable \$MASTER_ENB
4. F3, (RES_PCA)
5. F4,(YES)
6. APAGA el controlador. Espera unos segundos
7. ENCIENDE el controlador.

3.3.5 Conexión de los robots con PLC.

Se vio anteriormente que los robots no pudieron entrar en la conexión de Ethernet/IP debido a la falta de módulo de comunicación por lo que se optó por hacer una conexión cableada de la siguiente manera:

Cada robot cuenta con un PLC interno con un rack y tres módulos, dos son de entradas digitales de la serie AID16D (Figura 3.31)y el otro es un módulo de salida AOR16G (Figura 3.32).

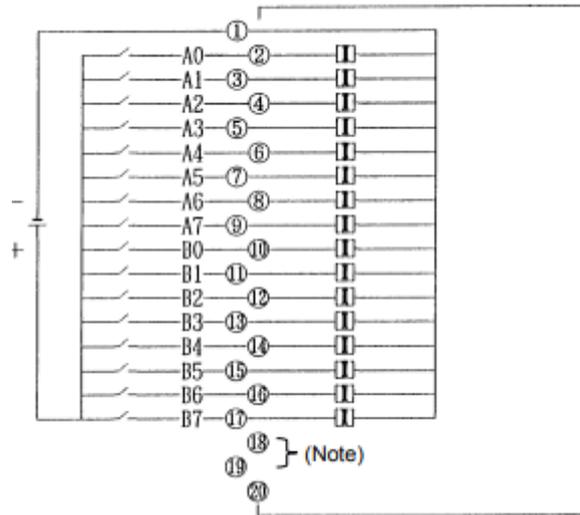


Figura 3.31: Módulo de entradas digitales AID16D

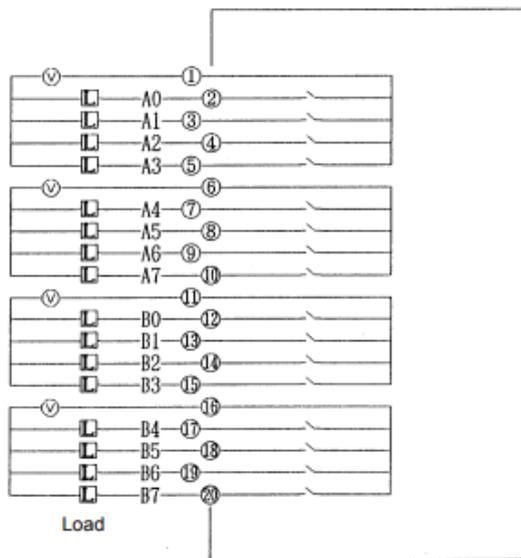


Figura 3.32: Módulo de salidas digitales AOR16G

Ya que el PLC interno del robot cuenta con los módulos se debe realizar un mapeo de las entradas y salidas para asignarles un nombre en este caso y por cuestiones de entradas internadas del robot, el primer módulo de entradas analógicas quedo en el rango de DI[301-315], y el módulo de salida en el rango de D0[301-115].

En la comunicación con el PLC con el robot en la conexión física del módulo de salida 1769-OW16 (Figura 3.33) de las salidas O3[1-3] con el módulo de entradas AID16D (Figura 3.34) del primero robot DI[25-26] con esta primer conexión el PLC tiene acceso a 3 bit para enviar datos al robot.



Figura 3.33: Módulo de salidas digitales AOR16G



Figura 3.34: Conexiones al PLC del Robot 1.

Y para la comunicación del Robot con el PLC el módulo de salida del PLC se utilizó las salidas DO[9-12] y el módulo de entrada del PLC I1[0-4].

El segundo robot se conectó de la misma manera solo que las salidas del PLC están del rango O[8-11] y en las entradas del rango I1[8-11].



Figura 3.35: Conexiones al PLC del Robot 2.

3.3.6 Programación del robot.

Lenguaje programación TPE

El lenguaje de programación básico de robots Fanuc se llama TPE, la estructura es parecida a la del lenguaje ensamblador[27].

Tipos de instrucciones: Registers, I/O, If/Select, Wait, JMP/LBL, Call Miscellaneous, Skip, Payload, Offset, Frames, Multiplecontrol, Program control[27].

Instrucciones con registros y registros de posición

Las variables disponibles a utilizar son: Los registros reales (32 bits) o entero, los registros de posición, puntos en coordenadas joint, puntos en coordenadas cartesianas o matrices. Estas son variables globales (todos los programas tienen acceso a todos los registros y registros de posición)[27].

Algoritmo de programación.

La programación del robot uno es esperar la señal del PLC que le indica cuando iniciar, al tener esta señal se ira a la posición de la caja para sostenerla y llevarla a la banda transportadora, después se ira a una posición cómoda donde esperara que el PLC le indique que ya termino el robot 2 y regreso la caja, al tener esta señal el robot se encarga de bajarla de la banda y acomodarla.

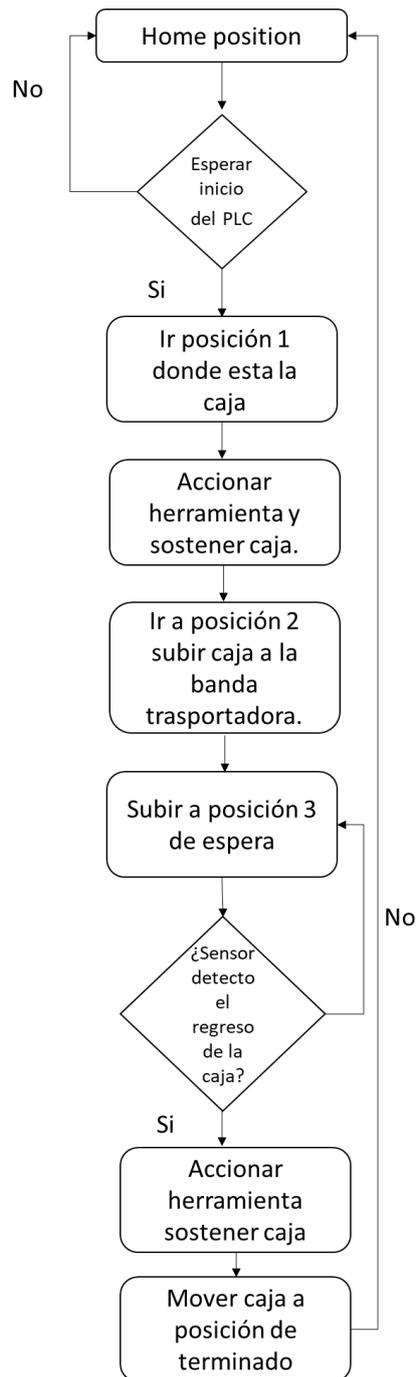


Figura 3.36 Algoritmo robot 1.

El robot dos esperara la señal del PLC donde le indica que ya lleo la caja a una posición cercana, con esto iniciara una simulación de soldadura al terminarla le enviara la señal al PLC para que siga con el proceso y este regresara a la Home position.

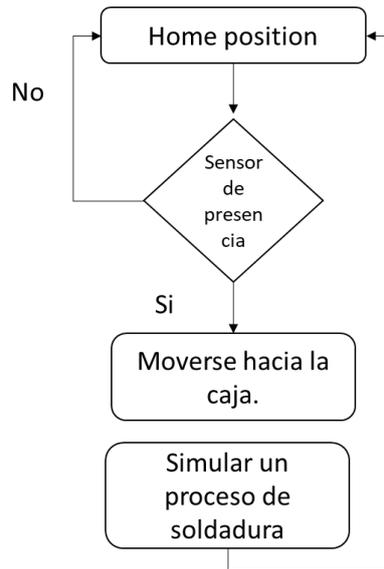


Figura 3.37 Algoritmo robot 2.

El switch en la celda robótica es el encargado de gestionar la comunicación y a él está conectado el Variador de velocidad, el PLC y la pantalla HMI con las siguientes direcciones IP:

Dispositivo	Dirección IP
PLC	192.168.1.100
Variador de Frecuencia	192.168.1.101
Pantalla HMI	192.168.1.102

Tabla 3.2: Direcciones IP.

3.3.7 Programación del PLC

El sistema inicia con la lectura de la velocidad indicada por el usuario para mover la banda transportadora, ya iniciando el programa entrara en acción el robot uno que colocara la caja sobre la banda, para después iniciar el movimiento de la banda hasta el otro extremo donde el siguiente robot le aplicara una simulación de proceso de soldadura, ya terminado el robot dos la banda transportadora lo enviara de regreso para que el robot uno la retire.

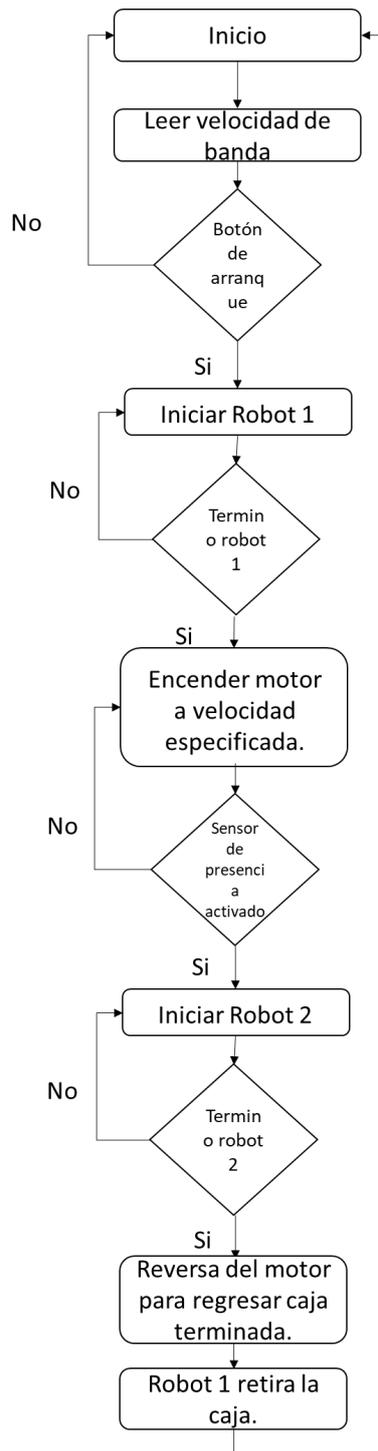


Figura 3.38 Algoritmo PLC.

Conversión de redes de Petri a escalera.

En el capítulo II se llegó a la conclusión de hacer el proceso en redes de Petri para convertirlo a escalera que es el lenguaje típico de un PLC, a continuación se explica el procedimiento.

El diagrama de lógica de escalera (LLD) se ha aplicado ampliamente a los sistemas de fabricación para diseñar controladores de secuencia y generalmente se

implementa en un PLC, que tiene las ventajas de confiabilidad, robustez y capacidad de programación directa. Los procedimientos de E / S del PLC son especificados por el LLD y las máquinas industriales, por lo tanto, realizan con seguridad operaciones repetitivas. Para la mayoría de los sistemas simples, es fácil programar el LLD con métodos heurísticos. Sin embargo, como los sistemas de fabricación modernos se han vuelto cada vez más complejos y de gran escala, el diseño del controlador de secuencia correspondiente se ha vuelto más difícil[28].

En consecuencia, la programación LLD también se ha vuelto más complicada y su aplicación es por lo tanto limitada. Además, el análisis cualitativo y las características de rendimiento de los procesos controlados por LLD rara vez se discuten. Además, a medida que cambian las especificaciones de diseño, el programa LLD por lo general debe modificarse de manera significativa. Por lo tanto, los investigadores persiguen enfoques de programación PLC sistemáticos y eficientes para la modelización, el análisis, la simulación y la evaluación de sistemas[28].

Recientemente, el enfoque de la red de Petri (PN) ha atraído mucho interés como herramienta potencial para el diseño de controladores de secuencia en sistemas de fabricación. Sin embargo, el enfoque de PN no es bien conocido por la mayoría de los ingenieros. Aunque el diagrama secuencial de funciones (SFC), una herramienta de representación basada en PN, se ha propuesto como el lenguaje programable estándar IEC 1131-3, en la práctica, los usuarios de PLC aún prefieren programar LLD directamente. Además, los profesionales industriales no tienen claro si el PN es superior al LLD para el control de la secuencia en diferentes aplicaciones. Por lo tanto, se requieren comparaciones realistas entre los enfoques LLD y PN, especialmente para los sistemas de fabricación a gran escala y complejos[28].

El PLC es el encargado de llevar a cabo la sincronización del robot por lo tanto se trabajó en la programación con redes de Petri, para realizar una simulación de este se utilizó el programa HPsim.

En la figura 3.39 se muestra la red de Petri de cada robot para llevar a cabo la sincronización.

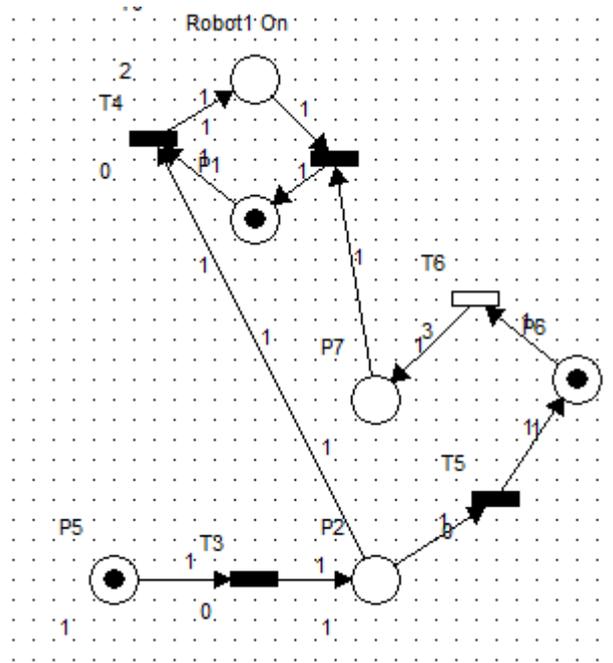


Figura 3.39 Diagrama Petri de cada robot.

La banda transportadora quedo interpretada de la siguiente manera (Figura 3.40):

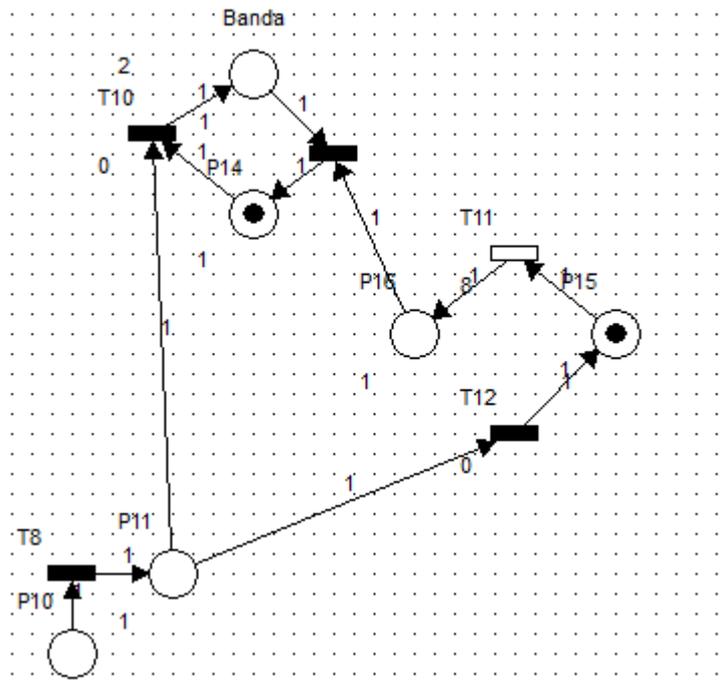


Figura 3.40 Diagrama Petri de banda transportadora.

El sistema completo de la celda donde se comprobó su funcionamiento fue el siguiente (Figura 3.41):

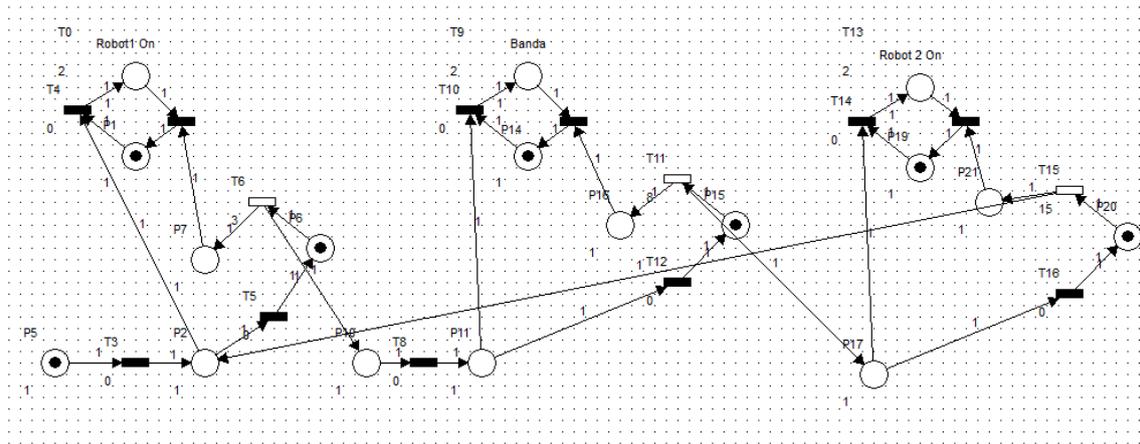


Figura 3.41 Diagrama Petri de la celda.

Ya terminada la simulación en redes de Petri se procedió a convertirlo a lenguaje escalera que es el más común para los PLC, en la siguiente tabla se muestra las igualdades de lenguaje escalera con Petri.

Basic elements	LLD	PN		
Nodes	Push button		Place	
	Normally open contact/switch			Transition
	Normally closed contact/switch			
	Relay coil			
	Timer			
	Counter			
	Solenoid			
Links	Line		Normal arc	
			Inhibitory arc	

Figura 3.42 Elementos escalera y Petri.

Dos factores principales para la comparación de LLD y PN para el control de la secuencia se identifican como la complejidad del diseño y el tiempo de respuesta. La complejidad del diseño se define como la complejidad asociada con el diseño de la lógica de control para una especificación dada. El tiempo de respuesta se denomina tiempo de exploración en LLD o tiempo de ejecución en PN. El factor principal para la complejidad del diseño es el tamaño físico del modelo de lógica de control, mientras que el tiempo de respuesta está influenciado no solo por el tamaño físico, sino también por el hardware de la implementación. Para simplificar, este documento se centra en la comparación de los modelos de lógica de control. El enfoque propuesto incluye dos pasos[28]:

Paso 1 Transforma el LLD y PN en el mismo formato IF-THEN.

Paso 2 Evalúe el LLD y PN basado en el número de (a) reglas y (b) operadores lógicos.

En general, los modelos de control usan un número menor de IF-THEN las reglas y los operadores lógicos son más fáciles de comprender, depurar, verificar y mantener. Además, pueden tener un tiempo de respuesta más corto. Por lo tanto, el enfoque propuesto se basa en el formato unificado basado en reglas para comparar la complejidad del diseño correspondiente y el tiempo de respuesta para diferentes estructuras de LLD y PN[28].

Básicamente, las reglas compuestas IF-THEN, que involucran conectivas tanto conjuntivas como disyuntivas en su parte antecedente o de conclusión, pueden clasificarse en los siguientes cuatro tipos básicos vistos en la siguiente tabla:

IF-THEN rules	LLD	PN
IF A and B, THEN C $A \wedge B \rightarrow C$		
IF A, THEN C and D $A \rightarrow C \vee D$		
IF A or B, THEN C $A \vee B \rightarrow C$		

Figura 3.43 Elementos lógicos escalera y Petri.

3.3.8 Software de Programación

Para realizar la programación en escalera del PLC COMPACTLOGIX que es de la marca Rockwell Automation se requiere de dos softwares uno es el RSLINK que es el encargado de realizar las conexiones con los elementos con los que se conecta el PLC, en la figura 3.44 se muestra la creación de un *Driver* de Ethernet/IP, como todos los elementos están interconectados con un switch se deben mostrar en la pantalla y asígnales una IP.

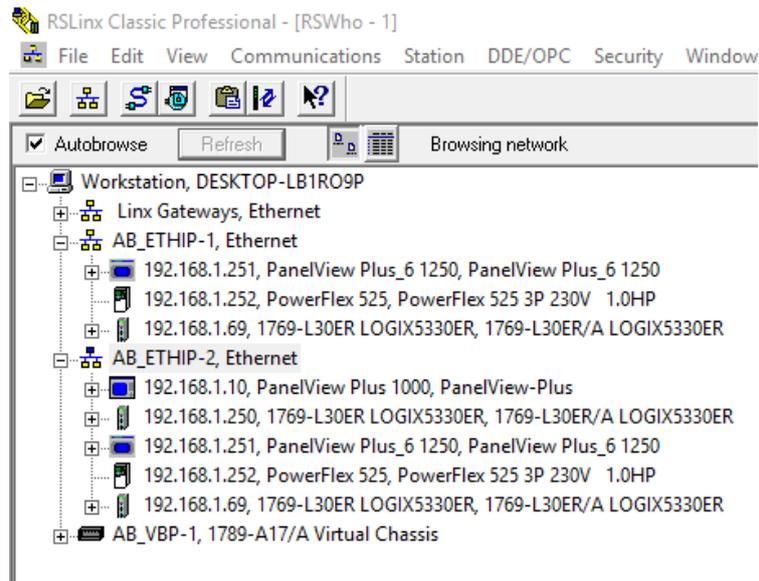


Figura 3.44 Rslinx creación de driver.

En la asignación de la IP del PLC se necesitó otro software el BOOT-DHCP Server.

Ya que se configuro las IP's de los equipos se procedió hacer la programación escalera en el software Rslogix 5000, en la figura 3.45 se muestra donde se agregaron todos los módulos del PLC, el variador de velocidad también se configuro por medio de este software utilizando el wizards de ayuda el cual cuenta con una lista de parámetros configurables como se ve en la figura 4.46.

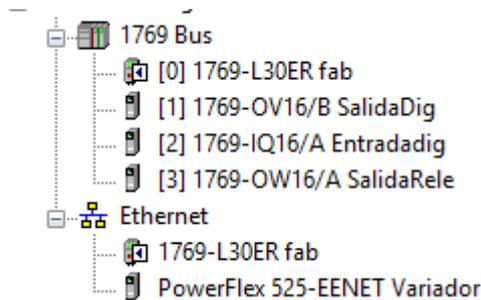


Figura 3.45 Módulos del PLC en Rslogix 5000.

PowerFlex 525

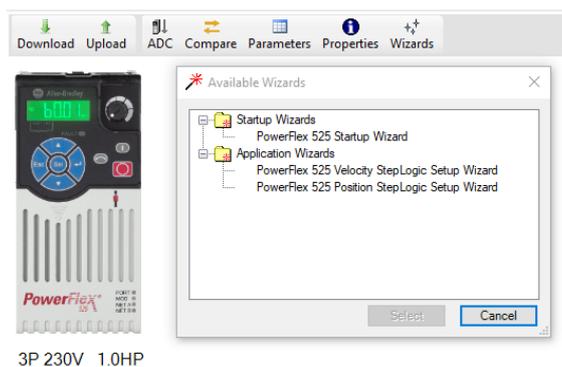


Figura 3.46 Configuración Powerflex en Rslogix 5000.

Programación de Panel View

La interfaz hombre máquina de la serie panel view se programan con el Software Factory Talk View Studio, es este se realiza el diseño de botones e indicadores para que un usuario pueda modificarlo o verificar el funcionamiento de este, en la figura 3.46 se observa como quedo la pantalla de visualización en la celda robótica.

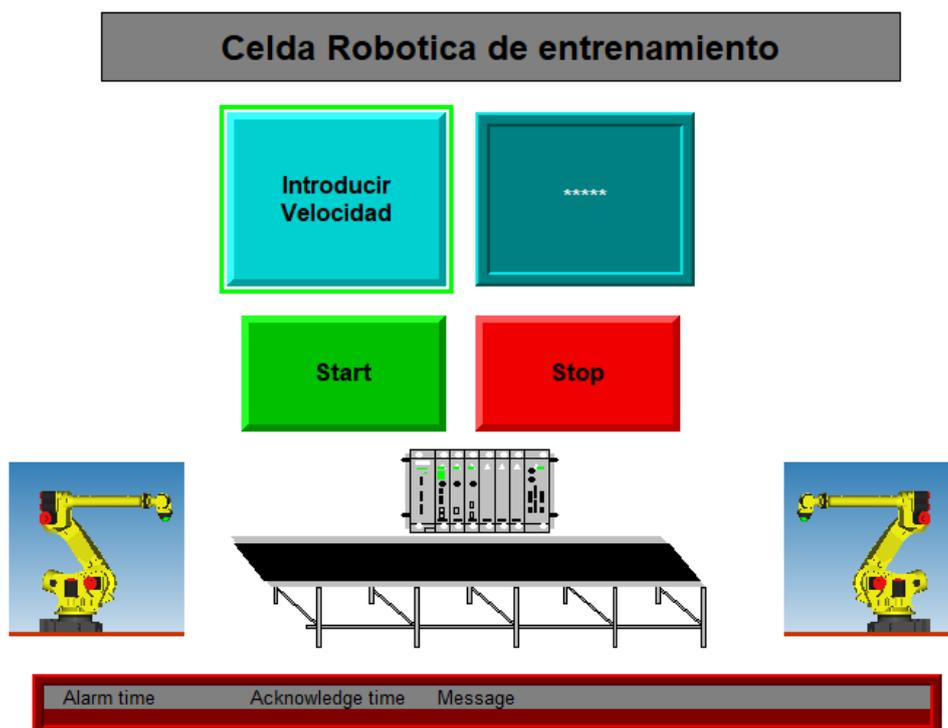


Figura 3.46 Pantalla visualización HMI

Esta es una captura de pantalla previa del proyecto, se observan los botones Start y Stop que son para iniciar con el procedimiento, además donde se encuentran los dibujos de los robots son botones que mandan a otra pantalla para ver status del robot, el PLC que está arriba de la banda también es un botón para configuraciones básicas.

Conclusión

En este capítulo se mostró la construcción del prototipo de la celda robótica, incluso se explicó cada elemento y el motivo por el que se utilizó complementando visto anteriormente, también en este capítulo se muestra la manera en la que se programó cada elemento de la celda para lograr la sincronización deseada.

Capítulo IV. Análisis de resultados

4.1 Resultados.

En este capítulo se describen los resultados de la celda robótica en funcionamiento. En este caso se utilizó un control secuencial para poder hacer la sincronización de la celda y se mostrara el análisis de este sistema y la utilidad para el personal del tecnológico.

La hipótesis de la tesis conlleva que la celda robótica esté lista para funcionar y para comprobar que la sincronización está terminada y que existe comunicación entre todos los elementos se decidió tomar el tiempo que tarda la celda robótica en terminar un proceso y con la banda transportadora a diferentes velocidades para verificar el funcionamiento de esta.

Las pruebas se muestran a continuación.

4.2 Velocidad de sincronización.

Aunque en la celda se puede elegir velocidad desde 0 Hertz hasta 60 Hertz, se eligieron 4 velocidades para observar la diferencia de tiempo, el robot 1 siempre tarda aproximadamente 21 segundos en terminar su proceso y el robot 2 tarda aproximadamente 9 segundos, por lo que sea mayor o menos el tiempo del proceso lo determina la banda transportadora ya que a esta se le puede determinar la velocidad.

Frecuencia del motor.	Tiempo realizar proceso
10 Hertz	142 Segundos
30 Hertz	72 Segundos
45 Hertz	62 Segundos
60 Hertz	54 Segundos

Tabla 4.1: Velocidades y tiempos.

4.3 Cinemática del robot.

Con los cálculos de la cinemática del robot en el capítulo 3 en esta sección se muestra la simulación que se realizó en Matlab para comprobar si con estos cálculos daban los movimientos reales del robot.

Simulación del Robot Fanuc R2000ia 210f

```
% L = LINK([alpha A theta D])
% L =LINK([alpha A theta D sigma])
% L =LINK([alpha A theta D sigma offset])
% L =LINK([alpha A theta D], CONVENTION)
% L =LINK([alpha A theta D sigma], CONVENTION)
% L =LINK([alpha A theta D sigma offset], CONVENTION)
```

```
>>L1=link([-pi/2,312,0,670])
>>L2=link([pi,1075,0,0,0,-pi/2])
>>L3=link([-pi/2,225,0,0])
>>L4=link([pi/2,0,0,-1280])
>>L5=link([-pi/2,0,0,0])
>>L6=link([0,0,0,-235])
>>Fanuc=robot({L1,L2,L3,L4,L5,L6},'Robot Fanuc R2000ia')
```

Robot Fanuc R2000ia (6 axis, RRRRRR)

α_i	a_i	θ_i	d_i	R/P	Tipo
-1.570796	312	0	670	R	(std)
3.141593	1075	0	0	R	(std)
-1.570796	225	1.570796	0	R	(std)
1.570796	0	0	-1280	R	(std)
-1.570796	0	0	0	R	(std)
0	0	0	-235	R	(std)

Tabla 4.2: Resultado de DH en Matlab.

```
>>drivebot(Fanuc)
```

Y obtenemos:

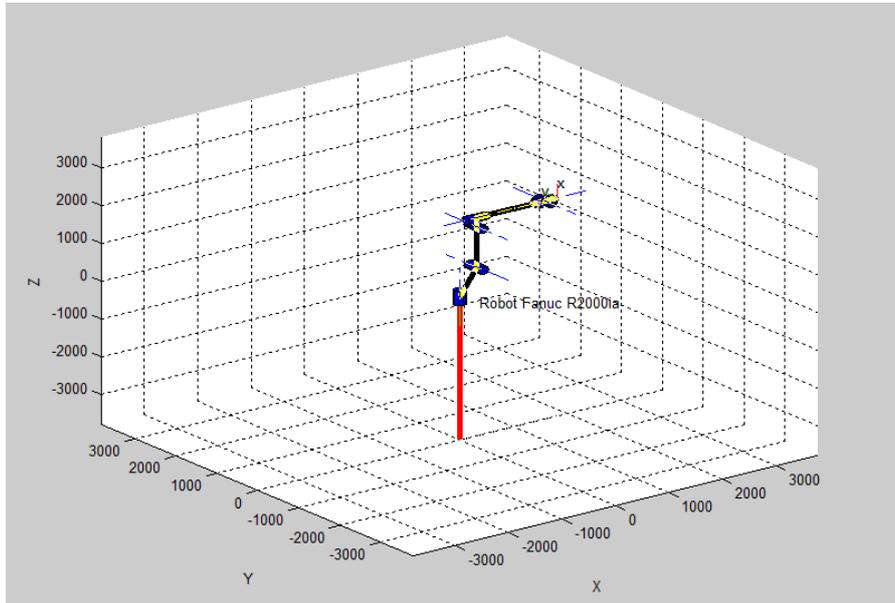


Figura 4.1 Modelo en Matlab.

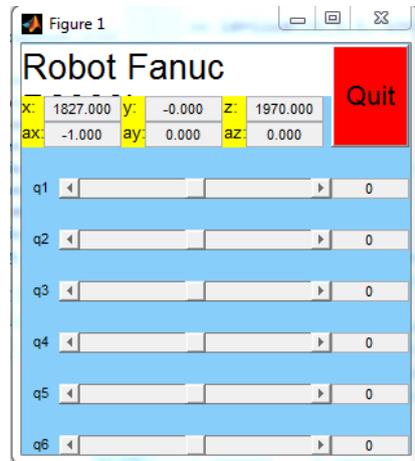


Figura 4.2 Control de movimiento en los ejes con Matlab.

4.3 Integración de los elementos.

La celda robótica se terminó como esta en las siguientes imágenes donde están todos los elementos integrados



Figura 4.3 Elementos del gabinete.



Figura 4.4 Robot con banda transportadora.



Figura 4.5 Gabinete con controladores de los robots.

Capítulo V.

Conclusiones.

Este trabajo de tesis tuvo cuatro objetivos particulares y un objetivo general, en este capítulo se mostrará las conclusiones generales del proyecto asimismo de una conclusión de cada uno de los objetivos explicando si se concretaron, también se expondrá las aportaciones que dejó el proyecto al tecnológico y por último los trabajos futuros de la celda robótica.

5.1 Conclusiones generales

Al iniciar este trabajo de tesis se hizo una recopilación de varios métodos para lograr la sincronización de los robots, se buscó que el sistema para realizar este trabajo estuviera relacionado con procedimientos frecuentes en la industria y así poder cumplir con los objetivos del proyecto, por esta razón se observa en el capítulo 2 como se fue delimitando a los sistemas de control más empleados en aplicaciones industriales y la solución se dio por medio control ON-OFF, un sistema de mucha aplicación en las empresas debido al amplio uso de los controladores lógicos programables, adicionalmente se hizo una recopilación de artículos científicos con problemas similares de sincronización con este tipo de controlador con esta investigación se encontró que la mayoría se solucionaba con redes de Petri por ser un método muy sencillo e ideal para soluciones secuenciales el cual otorgo como resultado la sincronización de los robots.

Los componentes que se utilizaron para equipar la celda son de marcas comerciales que actualmente se utilizan en la mayoría de las plantas de Hermosillo, se hizo uso de recurso de Conacyt por medio del proyecto "Celda robótica para entrenamiento industrial" y se efectuó una búsqueda de equipo de la mejor calidad buscando que la celda dure mucho tiempo, incluso es equipo algunos de los maestros en el tecnológico ya domina sencillo de programar, siempre se buscó en los estudiantes al momento de utilizar la celda se sientan en un ambiente real de trabajo. El único problema que se presentó al momento de la integración fue en la programación ya que el software del controlador tiene un precio muy elevado y no se contempló en la compra del equipo actualmente el tecnológico cuenta con pocas licencias.

El funcionamiento del sistema de control se demostró en el capítulo 4 donde se hicieron varias pruebas de tiempo en la sincronización y se muestra una serie de imágenes de la celda robótica con los elementos que se agregaron donde se pueden observar algunas las conexiones realizadas, la banda transportadora ubicada junto con los robots, el gabinete donde se encuentran los elementos de control e imágenes del interfaz usuario máquina del proyecto.

Como fue mencionado al inicio de este documento se necesitan egresados capacitados en este tipo de robot, con la sincronización y la integración de todo el equipo se logró concretar una celda con características similares a las que se encuentran en la industria. El sistema en este momento está trabajando en el laboratorio de mecánica del ITH y se encuentra listo para que alumnos y docentes puedan realizar prácticas.

5.2 Aportaciones

Al presente trabajo de tesis se le atribuyen los siguientes puntos:

- Un espacio más de prácticas para el tecnológico.
- Integración de equipo nuevo a la celda.
- Un control ON-OFF para su sincronización de los robots con la banda transportadora.
- Control de velocidad lineal en función a la frecuencia.
- Investigación de sistemas de control utilizados en problemas industriales.
- Una herramienta para un robot.
- Configuración en los robots.
- El sistema establecido en el laboratorio de Mecanica del ITH.

5.3 Recomendaciones a trabajos futuros

- Agregar alguna herramienta al robot que no tiene.
- Continuar con el desarrollo del modelo cinemático del robot y someterlo a otro tipo de controladores.
- Agregar más sensores a la celda para poder realizar más simulaciones.
- Establecer los límites de seguridad en los robots.
- Realizar una bitácora para el mantenimiento preventivo de los robots.
- Hacer un sistema de control más complejo ya que están todos los elementos funcionando.
- Establecer una computadora con licencia para facilitar la programación del PLC en el laboratorio.
- Conseguir la tarjeta de Ethernet/ip para robot Fanuc y así se eliminaría cable en las conexiones.
- Diseñar un curso básico para docentes.

Referencias

- [1] E. M. Guti, “Design of an optimal control for an autonomous mobile robot,” vol. 57, no. 1, pp. 75–83, 2011.
- [2] T. Bo Jørgensen, A. Wolniakowski, H. G. Petersen, K. Debrabant, and N. Krüger, “Robust optimization with applications to design of context specific robot solutions,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 53, no. April, pp. 162–177, 2018.
- [3] H. Is, “Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Multirobot coordination in pick-and-place tasks on a moving conveyor,” vol. 28, pp. 530–538, 2012.
- [4] J. Zhang, X. Fang, and L. Qi, “Sensitivity-analysis based method in single-robot cells cost-effective design and optimization,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 38, pp. 9–15, 2016.
- [5] Z. Wang, B. Zhou, D. Trentesaux, and A. Bekrar, “Approximate optimal method for cyclic solutions in multi-robotic cell with processing time window,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 98, pp. 307–316, 2017.
- [6] G. Rath, G. Probst, and W. Kollment, “Robot Control Unit for Educational Purposes zILt,” 2015.
- [7] F. J. Torres, G. V Guerrero, C. D. García, J. F. Gómez, M. Adam, and R. F. Escobar, “Master-Slave Synchronization of Robot Manipulators Driven by Induction Motors,” vol. 14, no. 9, pp. 3986–3991, 2016.
- [8] A. Montaña and R. Suárez, “Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Coordination of several robots based on temporal synchronization,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 42, pp. 73–85, 2016.
- [9] A. Al-Ahmari, “Optimal robotic cell scheduling with controllers using mathematically based timed Petri nets,” *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 329, pp. 638–648, 2016.
- [10] U. P. de C. BERCELONATECH, “Sistema De Control,” *Sist. Control*, pp. 5–12, 2014.
- [11] “Sistemas de control en lazo abierto y cerrado.” [Online]. Available: http://www.academia.edu/7885227/Sistemas_de_control_-_lazo_abierto_-_lazo_cerrado. [Accessed: 28-Jan-2018].
- [12] A. G. Pere Ponsa, “Diseño y Automatización Industrial,” p. 30, 2007.
- [13] “Control por PLC.” [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/josseanlo/control-por-plc>.
- [14] F. A. X. Da Mota, M. X. Rocha, J. J. P. C. Rodrigues, V. H. C. De Albuquerque, and A. R. De Alexandria, “Localization and Navigation for Autonomous Mobile Robots Using Petri Nets in Indoor Environments,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 31665–31676, 2018.
- [15] E. R. Alphonsus and M. O. Abdullah, “A review on the applications of

- programmable logic controllers (PLCs),” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1185–1205, 2016.
- [16] “Bandas Transportadora.” [Online]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/las-bandas-transportadoras-y-su-uso-en-la-industria-3346215.htm>. [Accessed: 10-Jun-2018].
- [17] M. de la Fuente, “Introduccion de sensores y tipos de sensores electromecanicos,” *Dep. Ing. Sist. y Automática, Univ. Valladolid*, pp. 1–21, 2013.
- [18] H. Gultekin, Ö. O. Dalgıç, and M. S. Akturk, “Pure cycles in two-machine dual-gripper robotic cells,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 48, no. June 2016, pp. 121–131, 2017.
- [19] Omega, “Pinzas.” [Online]. Available: <https://mx.omega.com/prodinfo/pinzas-grippers.html>. [Accessed: 03-Jun-2018].
- [20] J. C. Villajulca, “Tablero de control.” [Online]. Available: <https://instrumentacionycontrol.net/comenzando-desde-la-nada-el-tablero-electrico/>. [Accessed: 03-Oct-2018].
- [21] “Red EtherNet/IP.” [Online]. Available: <https://ab.rockwellautomation.com/es/Networks-and-Communications/Ethernet-IP-Network>. [Accessed: 07-Jul-2018].
- [22] C. V. R. Industriales, “Capitulo v. redes industriales,” pp. 150–158.
- [23] A. de Robótica, “Cinémática de robots,” 2015. [Online]. Available: <http://wiki.robotica.webs.upv.es/wiki-de-robotica/cinematica/>. [Accessed: 16-Oct-2018].
- [24] “Powerflex 525.” [Online]. Available: <https://ab.rockwellautomation.com/es/drives/powerflex-525>. [Accessed: 30-May-2018].
- [25] B. Description, “R-2000 i A Series Software : Mechanical : Control :,” 2000.
- [26] “3 Descripción De Las Partes Del Robot 4 Movimientos Del Robot 5 E / S.”
- [27] assembly plant hermosillo ford, “3 Descripción De Las Partes Del Robot 4 Movimientos Del Robot 5 E / S,” p. 139, 2017.
- [28] J. S. Lee and P. L. Hsu, “An improved evaluation of ladder logic diagrams and Petri nets for the sequence controller design in manufacturing systems,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 24, no. 3–4, pp. 279–287, 2004.