



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SUMINISTRO INTELIGENTE DE HERRAMIENTAS
PARA UN ROBOT EN UNA CELDA DE
MANUFACTURA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

P R E S E N T A

MANUEL ALEJANDRO CASTILLA GALLARDO

DIRECTOR DE TESIS: DR. MARIO PEÑA CABRERA / IIMAS



CDMX

Noviembre 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Índice de contenido

Agradecimientos.....	4
Índice de tablas	5
Índice de figuras	6
Resumen.....	8
Capítulo I: Introducción.....	9
1.1. Objetivo.....	10
1.2. Definición del problema.....	10
1.3. Estructura de la tesis.....	11
Capítulo II: Marco teórico.....	12
2.1 Mesas indexadas.....	13
2.2 Celdas de manufactura.....	14
2.3 Actuadores inteligentes.....	19
2.4 Herramientas para robots.....	19
2.5 Robots multitareas.....	20
2.6 Robots multiagentes.....	23
Capítulo III: Estado del arte de las mesas indexadas.....	24
3.1 Mecanismos indexados.....	24
3.2 Manufactura avanzada.....	26
Capítulo IV: Diseño mecánico de la mesa indexada.....	29
4.1 Descripción global de la mesa indexada.....	29
4.2 Chasis o estructura.....	30
4.3 Plato giratorio.....	30
4.4 Transmisión mecánica.....	31
4.5 Sistema eléctrico-electrónico.....	31
4.6 Parámetros cinemáticos y dinámicos para el diseño mecánico de la mesa indexada.....	32
4.7 Cálculo de la transmisión mecánica de la mesa indexada.....	32
4.8 Manufactura de la mesa indexada.....	35
4.9 Implementación de la mesa indexada a la celda de manufactura.....	38
4.10 Parámetros para el diseño mecánico del cambio rápido.....	39
4.11 Especificación de diseño del cambio rápido.....	42
4.12 Manufactura del cambio rápido.....	44
4.13 Implementación del cambio rápido en robot KUKA KR5.....	45
Capítulo V: Diseño electrónico de la mesa indexada.....	46
5.1 Diagrama de bloques.....	46
5.2 Diseño electrónico de la mesa indexada.....	48
5.3 Antecedentes de diseño.....	48
5.4 Requerimientos electrónicos.....	50
5.5 Descripción del procesador F28379D: características.....	55
5.6 Selección de módulos del controlador (DSP).....	58
5.7 Configuración del hardware.....	58

5.8	Implementación del hardware en la mesa indexada.....	61
5.9	Descripción de la programación de la mesa indexada.....	62
5.10	Adecuación de señales y niveles de voltaje de operación.....	64
5.11	Diseño de GUI para la parametrización de la mesa indexada.....	65
Capítulo VI: Implementación de mesa indexada a celda.....		70
6.1	Descripción de la celda de manufactura: componentes.....	71
6.2	Descripción del robot KUKA KR5: mecánica.....	75
6.3	Descripción del robot KUKA KR5: electrónica.....	76
6.4	Descripción de la programación del robot KUKA KR5.....	77
6.5	Esquema de solicitud de herramientas.....	79
Capítulo VII: Resultados experimentales.....		80
Conclusiones y recomendaciones.....		95
Referencias.....		97

Agradecimientos

No se puede hablar de la concreción de esta tesis, y más aún, de la concreción de mi posgrado sin mencionar a mi amada madre, Amelia Gallardo (Q.E.P.D.), aquella persona maravillosa que lo dio y sacrificó todo por mí, y de la cual me siento muy orgulloso de ser su hijo. A mi hermano Diego y su familia, a mis primos Dany y Armando, a los cuales considero mis hermanos, a mi maravillosa amiga y novia, Alejandra, que me apoyó como nadie en momentos difíciles, y al resto de mi grandiosa familia que siempre estuvo pendiente de mi avance y desarrollo profesional.

A mis amigos más cercanos: Fabiola, Enrique, Christopher y Óscar, que siempre estuvieron y han estado a mi lado a lo largo de mi carrera profesional y laboral, que compartieron momentos muy importantes y esenciales en el desarrollo emocional de mi persona, que me dieron su apoyo incondicional cuando lo necesité, que siempre me motivaron para salir adelante.

A mi enorme fuerza de voluntad, de la cual me siento orgulloso, puesto que me hizo sacrificar muchas cosas, me hizo perder muchas fiestas, muchas citas, muchas salidas al antro, pero que al final me recompensó con otorgarme la gran responsabilidad y honorabilidad de ser un gran ingeniero.

Al CONACYT, que sin su gran apoyo y sustento, me habría sido muy difícil realizar mis estudios de maestría.

Finalmente, a la UNAM, la máxima casa de estudios, que me dio la oportunidad de realizar una carrera profesional, que me dio la oportunidad de ingresar a la Facultad de Ingeniería, y siete años después, al posgrado, que me dio la oportunidad de desarrollarme en la mejor carrera de ingeniería que existe: Ingeniería Mecatrónica, y ahora la posibilidad de especializarme en la electrónica y sus sistemas. Todo lo anterior no hubiera sido posible si no amara tanto a mi carrera, sus campos de aplicación y su historia.

No me queda más que dedicar este humilde título a mi madre, lo más sagrado que tuve, y que no tuvo la oportunidad de ver mi consagración como maestro en ingeniería. Donde quiera que estes, te mando un enorme abrazo y todo mi amor y reconocimiento como una gran persona de bien, amorosa y entregada.

“Aquel que tiene un porqué para vivir se puede enfrentar a todos los “cómos””.

Friedrich Nietzsche

“Hay que tener el valor de decir la verdad, sobre todo, cuando se habla de la verdad”.

Platón

“Elige un trabajo que te guste y no tendrás que trabajar ni un día de tu vida”.

Confucio

Índice de tablas

Tabla 4.1 Materiales para construcción de mecanismo indexado.....	32
Tabla 4.2 Parámetros de funcionamiento propuestos para el mecanismo indexado.....	33
Tabla 4.3 Parámetros de velocidad y aceleración angulares del plato.....	33
Tabla 4.4 Parámetros de inercia y par motor.....	33
Tabla 4.5 Especificaciones mecánicas y eléctricas mínimas del motor del mecanismo.....	34
Tabla 4.6 Componentes mecánicos de la mesa indexada.....	36
Tabla 4.7 Propiedades mecánicas del aluminio.....	43
Tabla 5.1 Especificaciones eléctricas de la mesa index.....	50
Tabla 5.2 Señales involucradas en la mesa indexada.....	54
Tabla 5.3 Características del procesador.....	56
Tabla 5.4 Módulos del DSP	58
Tabla 5.5 Descripción de módulos de adecuación de voltaje.....	64
Tabla 6.1 Características del conveyor de la celda.....	72
Tabla 6.2 Características del sistema de visión de la celda.....	72
Tabla 6.3 Características de la mesa indexada de la celda.....	73
Tabla 6.4 Características de la mesa de trabajo.....	74
Tabla 6.5 Descripción general del programa del robot.....	79
Tabla 6.6 Esquema de solicitud de herramientas.....	79
Tabla 7.1 Roles y responsabilidades del proyecto.....	81
Tabla 7.2 Check List estático.....	83
Tabla 7.3 Check List dinámico.....	84
Tabla 7.4 Datos de placa del dispositivo.....	84
Tabla 7.5 Esquema de medición de mesa indexada y herramienta	86
Tabla 7.6 Valores de medición de mesa indexada y herramienta	90
Tabla 7.7 Valores de rango por fase	90
Tabla 7.8 Valores de rango promedio por fase	90
Tabla 7.9 Rango promedio de todas las fases	90
Tabla 7.10 Medición promedio por fase	91
Tabla 7.11 Diferencia entre promedio mayor y menor	91
Tabla 7.12 Gráfico de repetibilidad y reproducibilidad	92
Tabla 7.13 Tabla de resultados de desempeño del equipo	93
Tabla 7.14 Tabla de porcentajes de desempeño del equipo	94

Índice de figuras

Figura 2.1 Mesa indexada para proceso de ensamble.....	12
Figura 2.2 LayOut de tipo en línea.....	13
Figura 2.3 LayOut de tipo lazo.....	14
Figura 2.4 LayOut de tipo escalera.....	15
Figura 2.5 LayOut de tipo campo abierto.....	16
Figura 2.6 LayOut de tipo centrada en robots.....	17
Figura 2.7 Actuadores eléctricos inteligentes.....	18
Figura 2.8 Efecto final para pintura.....	19
Figura 2.9 Efecto final para soldadura.....	19
Figura 2.10 Efecto final para fresar.....	19
Figura 2.11 Efecto final para corte de agua con abrasivo.....	20
Figura 2.12 Efecto final para manipulación.....	20
Figura 2.13 Efecto final para inspección.....	20
Figura 2.14 Efecto final para cambio rápido de herramienta.....	21
Figura 2.15 Esquema de robot multiagente.....	22
Figura 3.1 Mesas de estaciones definidas Weiss.....	24
Figura 3.2 Mesas de estaciones programables CDS.....	24
Figura 3.3 Celda de producción en línea.....	25
Figura 3.4 Celda de tecnología de grupos.....	26
Figura 3.5 Celdas funcionales.....	27
Figura 4.1 Concepto inicial de la mesa indexada.....	28
Figura 4.2 Chasis de la mesa indexada.....	29
Figura 4.3 Plato giratorio.....	30
Figura 4.4 Transmisión mecánica.....	31
Figura 4.5 Conjunto de sistema eléctrico-electrónico de la mesa indexada.....	31
Figura 4.6 Perfil de velocidad trapezoidal considerado para la mesa indexada.....	32
Figura 4.7 Dimensiones generales de la mesa indexada.....	35
Figura 4.8 Manufactura y ensamble de mesa indexada.....	37
Figura 4.9 Implementación de la mesa indexada a la celda de manufactura.....	38
Figura 4.10 Cambio rápido.....	39
Figura 4.11 Conexión de muñón y portaherramienta (vista lateral interna).....	40
Figura 4.12 Detalle del cambio rápido y portaherramienta.....	40
Figura 4.13 Detalle del cambio rápido en robot.....	41
Figura 4.14 Detalle del cambio rápido en celda.....	41
Figura 4.15 Dimensiones generales del cambio rápido.....	42
Figura 4.16 Mecanizado CNC del aluminio para cambio rápido.....	44
Figura 4.17 Implementación del cambio rápido.....	45
Figura 5.1 Diagrama de bloques del sistema electrónico.....	46
Figura 5.2 Diagrama de bloques gráfico del sistema electrónico.....	47
Figura 5.3 Diagrama de bloques del sistema electrónico.....	49
Figura 5.4 Diagrama de flujo del sistema electrónico.....	51
Figura 5.5 Diagrama de bloques funcional del F28379D.....	55
Figura 5.6 Vista general del F28379D.....	57
Figura 5.7 Configuración del ADC.....	59

Figura 5.8 Configuración del ePWM.....	59
Figura 5.9 Configuración del eQEP.....	60
Figura 5.10 Configuración del SCI.....	60
Figura 5.11 Configuración del GPIO.....	61
Figura 5.12 Esquematación del sistema electrónico de la mesa indexada.....	62
Figura 5.13 Configuración de los estados del proyecto.....	63
Figura 5.14 Módulos relevadores y convertidores CC de la mesa indexada.....	64
Figura 5.15 Programación de la GUI.....	66
Figura 5.16 Interfaz de control vía BT para la mesa indexada.....	67
Figura 5.17 Diagrama de flujo del uso de la app.....	68
Figura 6.1 Interconexiones de mesa index y robot.....	70
Figura 6.2 Arquitectura de celda de manufactura.....	71
Figura 6.3 Conveyor.....	72
Figura 6.4 Sistema de visión.....	72
Figura 6.5 Mesa indexada	73
Figura 6.6 Mesa de trabajo.....	74
Figura 6.7 Robot KUKA.....	74
Figura 6.8 Dimensiones generales del robot.....	75
Figura 6.9 Especificaciones técnicas del robot KUKA KR5.....	75
Figura 6.10 Características eléctricas del KUKA KR C4.....	76
Figura 6.11 Vista general del controlador KUKA KR C4.....	76
Figura 6.12 SmartPAD.....	76
Figura 6.13 Ejemplo de código de programa de robot.....	77
Figura 6.14 Módulo de E/S del robot.....	78
Figura 7.1 Vista superior del plato con posiciones asignadas.....	81
Figura 7.2 Pruebas de desempeño de mesa indexada.....	93

RESUMEN

Las celdas de manufactura representan, hoy en día, gran parte de los beneficios que las grandes industrias reportan anualmente al ser estas su principal fuente de producción y desarrollo, dada su flexibilidad y versatilidad que existe en muchas de ellas, gracias a componentes esenciales como robots y dispositivos que pueden adquirir la característica de adaptarse a nuevos procesos sin tener que realizar mayores modificaciones o ajustes al hardware existente. Y es justo en este último concepto en donde el proyecto desarrollado en esta tesis tiene cabida, pues la mesa indexada tiene la capacidad de dotar de una mayor autonomía a este tipo de celdas al transportar diversos componentes que agreguen valor a los procesos. Además se aborda desde su conceptualización hasta su fabricación e implementación dentro de la celda de manufactura en el laboratorio de Automatización del Dr. Mario Peña en el IIMAS, donde actualmente se llevan proyectos de diversa índole con el robot, pero que al final convergen en uno más ambicioso y de largo alcance. Sin embargo, la finalidad de este proyecto de investigación es la de presentar una mejor alternativa en cuanto al diseño y control eléctricos que un sistema de esta naturaleza pueda ofrecer, pues la mayoría de los dispositivos industriales cuentan ya con controladores de alto nivel como PLC's, los cuales se encuentran preconfigurados para labores de este estilo, sin embargo su costo y disponibilidad los hacen susceptibles al cambio. En cuanto al diseño mecánico, las ventajas que este mecanismo presenta son las de un diseño más sencillo, compacto, robusto y accesible en cuanto a los materiales y procesos de manufactura involucrados, así como en la instalación en el lugar de operación.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la automatización industrial juega un rol muy importante y está en constante evolución, y la Industria 4.0 es una demostración de eso. La I4.0 es un fenómeno que apunta a lograr un nivel más alto de eficiencia operacional y productividad, así como también un nivel más alto de automatización, conducida por una aplicación y una tecnología; la primera se refiere a las oportunidades para la diferenciación y ventajas competitivas, conducida por procesos de producción automatizados, flexibles y ágiles que los fabricantes pueden adoptar. Por otro lado, la tecnología se refiere al número de desarrollos tecnológicos convergentes, que incluyen conectividad a internet extensa, incremento de la miniaturización, costo-efectividad, y capacidad de hardware tal como sensores y actuadores. En este sentido, la tecnología ha también invertido en sistemas de control industrial que, debido a su alta complejidad en plantas a controlar, y la necesidad consecuente de técnicas de control más inteligentes, han sido movidos de soluciones centralizadas hacia aquellas basadas en retroalimentación distribuida, requiriendo la introducción de tecnologías modernas. De hecho, un sistema de control industrial típico, compuesto por PLC's, interfaces de sensores y actuadores y comunicación mediante buses de campo, tiene que tratar con sistemas físicos más complejos, requiriendo mayor funcionalidad, reactividad y adaptabilidad para permitir técnicas de control innovadoras. Sin embargo, la adopción de nuevas tecnologías puede ser riesgosa y costosa para compañías pequeñas y medianas. Por lo tanto, hay una necesidad creciente para herramientas y metodologías que apoyen la actualización de viejos equipos mientras los mejoran con nuevas características que permitan proveer funcionalidad de punta. Es precisamente una herramienta, la que será descrita a lo largo de esta tesis, la que aportará una mayor efectividad y autonomía a una celda de manufactura, en donde el principal sistema, un robot industrial, desempeñará tareas sofisticadas y complejas en la medida en que se le puedan surtir distintas herramientas sin intervención alguna de alguna persona u operador.

Es un hecho que mucha de la tecnología industrial es parte de consorcios extranjeros con todo el *know-how* recopilado a través de los años, lo que consecuentemente ha hecho cada vez más difícil la proliferación de nuevas tecnologías de origen nacional, pues estas se topan con obstáculos al intentar competir con los líderes en el mercado. No obstante, se presenta un reto interesante, pues si bien existe mucho avance tecnológico, paradójicamente la tecnología nunca deja de evolucionar, y prueba de ello son los esfuerzos de instituciones y universidades por dotar a sus estudiantes de las mejores herramientas posibles para hacer afrenta a esta disyuntiva, tal es el caso de la UNAM y el IIMAS, en donde el desarrollo tecnológico es un tema prioritario.

1.1 Objetivo

Ya se ha hablado acerca de la celda de manufactura y algunos de sus componentes que la integran. Sin embargo, es importante destacar la importancia de su concepción, sus fines y futuras aplicaciones que se pretende llevar a cabo en ella. Para entender el contexto, se trata de un espacio dentro de las instalaciones del IIMAS, en donde un robot *KUKA KR5* es el principal actor dentro de él, así como de algunos otros dispositivos, tales como una banda transportadora, un sistema de visión, etc., y cuya integración facilita y potencializa las funciones para las que fue concebida. Entre estas funciones están las de la manufactura aditiva y sustractiva, en donde, de manera poco convencional, se equipa al robot para que este pueda desempeñar tareas tales como las de una impresora 3D, solo que a una escala mucho mayor, y gracias a su flexibilidad y versatilidad, es posible crear piezas que generan mayor impacto en las aplicaciones en las que fueron pensadas. Algunas otras funciones son las de desempeñar tareas de manufactura convencionales, como fresado, atornillado, lijado, etc., no obstante, el desempeñar dichas tareas actualmente requiere de la participación de una persona que pueda cambiar y ajustar herramientas en el robot, labor que irremediamente genera pérdidas de tiempo valioso a la hora de ejecutarlas. En ese sentido, y como tema de proyecto de tesis, se optó por proponer, conceptualizar, diseñar e implementar un sistema independiente que pueda surtir de herramientas al robot, de manera autónoma y conforme a una estructura o algoritmo previamente planeado y descargado en la celda de manufactura. Este sistema se trata de una mesa indexada, la cual consta de un mecanismo que, como su nombre lo indica, indexa o alterna posiciones, así como de un plato o estructura que tendrá espacio para seis herramientas distintas, y que estarán localizadas a una misma distancia, pero siempre en la posición que así convenga a la celda para facilitar al robot la labor de tomar y devolver herramientas. Dicha posición será comandada por un motor a pasos que siempre registre y guarde sus posiciones, a fin de conocer siempre qué herramienta se tomó y qué herramienta es la que continua dentro del ciclo de ejecución del algoritmo de manufactura.

1.2 Definición del problema

La continuidad en cualquier proceso de manufactura es un factor clave para su éxito, y para ello se requiere contar con los dispositivos y herramientas adecuados, siendo estos factores que forman parte del concepto de diseño de la mesa indexada. Su correcta descripción, interpretación, integración sinérgica y funcionamiento coordinado proveerán a la celda de una autonomía armoniosa y dará pie a que el personal que labore a futuro se centre en otros aspectos fundamentales, como lo es la manipulación, creación y gestión de datos, resultado de los procesos que allí se lleven a cabo. Es decir, una autonomía en la celda dirigirá los enfoques en mejorar y

atender otros temas involucrados con la I4.0, que vendrán a complementar el objetivo global para el que esta celda fue concebida originalmente.

La mesa indexada se trata de un dispositivo complejo que utiliza algunas de las ramas de la ingeniería más importantes hoy en día, como la mecánica, electrónica y la programación computacional en sistemas electrónicos, la parte de diseño e integración electrónicos toma un papel importante. En esta tesis, el peso más importante recae en la parte de diseño electrónico, cabe resaltar que, a pesar de que en el mercado existen algunas integraciones o sistemas que pudieran adecuarse e intentar utilizarse para este proyecto en específico, se busca diseñar un controlador a la medida, que satisfaga las necesidades de la celda, del robot, y dé pie a futuras integraciones con otros sistemas similares, con el fin poderlo escalar sin hacer cambios drásticos y dificultosos.

1.3 Estructura de la tesis

Con la finalidad de ofrecer una mejor estructuración al apreciable lector, se explicará brevemente el curso del documento y cómo es que está diseñado para así tener una mejor percepción del mismo. En el capítulo II se aborda el marco teórico que envuelve a la mesa indexada en el marco de las celdas de manufactura y todos los conceptos que giran en torno a ella.

En el capítulo III se describe el estado del arte de las mesas indexadas: tipos, aplicaciones y algunos fabricantes.

En el capítulo IV se aborda el diseño mecánico de la mesa indexada presentada en esta tesis.

El capítulo V abarca el diseño electrónico, es decir, el tema central de este proyecto y sus pormenores involucrados en el desarrollo del mecanismo.

El capítulo VI engloba la integración de la mesa indexada en la celda de manufactura y en el capítulo VII se presentan los resultados y conclusiones obtenidas, así como las referencias en las que el proyecto fue basado.

A manera de ofrecer un mayor entendimiento del proyecto, al final se entrega, en forma de anexo, diagramas eléctricos, planos mecánicos, especificación de la mesa indexada, código de programación del DSP y robot, así como la memoria de cálculo que permitió el dimensionamiento del sistema.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En las últimas décadas la industria de la manufactura ha sufrido cambios vertiginosos. Cambios en cuanto a la velocidad de entrega de los pedidos, diversidad y calidad de los productos, entre otros. Los clientes son cada vez más exigentes y sus gustos más variados; el ciclo de vida de los productos se reduce considerablemente. Ante esta diversidad, y nuevos requerimientos, las empresas manufactureras se ven obligadas a adoptar medidas enfocadas a acrecentar la productividad, disminuir los costos y, recientemente, a flexibilizar sus flujos de producción. En un mundo competitivo y globalizado como el que prevalece actualmente, las industrias se enfrentan en una contienda en que prevalece la ley del más competitivo; los que son capaces de adaptarse a este cambio abrupto son, por lo general, los que están dispuestos a invertir gran cantidad de recursos y esfuerzo en la reestructuración organizacional y modernización de sus instalaciones. Los otros estarán destinados a extinguirse. En términos de manufactura, esta agilidad se traduce en un conjunto de soluciones, una de las cuales es la denominada automatización.

La automatización es una tecnología dinámica que representa un proceso evolutivo continuo que comenzó muchas décadas atrás. En efecto, el ser humano a través de la historia se ha preocupado del desarrollo de técnicas y tecnologías que puedan acelerar los ciclos de producción para disminuir el esfuerzo, minimizar al máximo los costos, satisfacer un mercado en crecimiento, y ganar posicionamiento con respecto a sus pares. Tal vez el crecimiento más significativo, en términos de desarrollo de las tecnologías de manufactura, se ha dado sólo en los últimos tres siglos, sin embargo, el desarrollo de la manufactura ha jugado un papel importante durante la evolución de la especie humana. La primera revolución industrial trajo consigo la incorporación de nuevos conceptos en términos tecnológicos, socioeconómicos y culturales, en un período que circunda el año 1770, aunque ya se visualizaba un acercamiento a los actuales sistemas flexibles de manufactura con trabajos de máquinas que aparecieron posteriormente hacia los años 60.

Los sistemas flexibles de manufactura (SFM) se presentan como una solución (hasta cierto punto) a los problemas presentes en el mundo moderno en muchos sectores industriales, existiendo hoy en día variadas configuraciones arquitectónicas instaladas, abarcando las más diversas aplicaciones en la fabricación de productos. Uno de los grandes retos de la fábrica moderna es el de disminuir el ciclo de vida de los productos; como una forma de enfrentar la filosofía de algunas empresas japonesas de considerar la inversión inicial de un producto como un costo despreciable. Los sistemas flexibles de manufactura ofrecen un compromiso entre productividad y flexibilidad. Con esto, es

necesario contar con sistemas rápidamente configurables a la hora de modificar un producto o incorporar uno nuevo.

Un sistema flexible de manufactura consiste en un grupo de estaciones de procesamiento, interconectadas por medio de un sistema de manipulación y almacenamiento de material y controlado por un sistema computacional integrado. Al extrapolar este concepto y llevarlo a un caso en concreto, se encuentran similitudes con la celda de manufactura de la que es parte este proyecto de tesis, y la cual consiste en un grupo de sistemas interconectados, entre ellos un robot de seis grados de libertad, un transportador sinfín, un sistema de visión y por supuesto, una mesa indexada. En el apartado siguiente se abordará, de manera más detallada, el estado del arte de la celda, así como su influencia como parte del proyecto de titulación.

2.1 Mesas indexadas

Los procesos que realizan estos mecanismos ⁽²⁵⁾ son muy diversos. En general, se utilizan para unificar en una sola máquina distintos procesos de montaje. Las mesas indexadas permiten integrar máquinas en las distintas estaciones de la mesa. Las máquinas que se incorporan realizarán los subensamblajes de componentes o procesos que se requieren en la pieza final, o bien, ayudan a mejorar otros procesos al sincronizarse, dotando de gran valor al proceso global que se vaya a ejecutar.

Existen varias tecnologías de indexado, pero las más destacables son las de indexado fijo o mecánico, en donde a partir de características definidas, se diseña y construye el mecanismo a la medida, ofreciendo bastante repetibilidad y precisión, pero con la desventaja de no poder cambiar o modificar posiciones. Las del tipo libre, o eléctricas, las cuales son gobernadas por servomotores o motores a pasos, proporcionan una mayor flexibilidad en cuanto a posicionamiento, y su precisión está directamente relacionada con la calidad de manufactura del actuador eléctrico.



Fig. 2.1 Mesa indexada para proceso de ensamble ⁽²⁵⁾

El capítulo III explica, de manera general, el estado del arte de las mesas indexadas, exponiendo algunos tipos y modelos aplicados hoy en día, así como su involucramiento en operaciones industriales, cobijadas estas por lo presentado en el marco teórico, para que en el capítulo IV ya se tenga un mejor antecedente y se entienda de mejor manera el diseño mecánico proyectado y desarrollado en este proyecto.

2.2 Celdas de manufactura

Las celdas de manufactura son sistemas productivos que permiten descomponer una fábrica en minifábricas o celdas las cuales son unidades más simples donde se fabrican familias de partes. Este cambio facilita enormemente la administración y el control del sistema de producción, y al mismo tiempo lo hace más flexible con lo cual puede responder de una manera más ágil a los cambios que se pueden dar en el mercado. Adicionalmente, también reducen el transporte y la manipulación de los materiales en proceso, debido a que una parte no debe moverse por toda la planta sino únicamente al interior de la celda; estas y otras ventajas han llevado a la difusión e implementación de las celdas de manufactura en muchas partes del mundo. Se trata de una de las arquitecturas productivas más deseables para sistemas de manufactura flexibles, ya que representa una de las aplicaciones de manufactura esbelta.

Existen varias configuraciones de celda⁽⁴⁾, pero las más empeladas actualmente son:

- LayOut de tipo en línea

Las máquinas y el sistema de manejo de materiales están arreglados en una línea recta. Las partes se mueven de una estación de trabajo a la otra en una secuencia bien definida, con trabajo siempre moviéndose en una dirección sin flujo de regreso.

Manejo de materiales: sistema de transferencia en línea; sistema de banda transportadora; Sistema de vehículo guiado por vías.

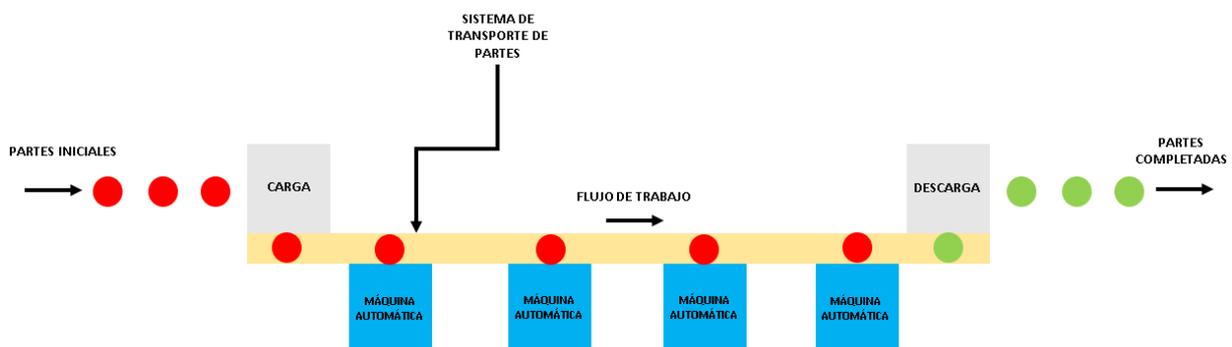


Fig. 2.2 LayOut de tipo en línea⁽⁴⁾

- LayOut de lazo

Las estaciones de trabajo están organizadas en un lazo que es servido por un sistema de manejo de partes en la misma forma de trayectoria cerrada. Las partes normalmente fluyen en una dirección alrededor del lazo con la capacidad de detenerse y ser transferidos a cualquier estación.

Manejo de materiales: sistema de banda transportadora; carros arrastrados en planta.

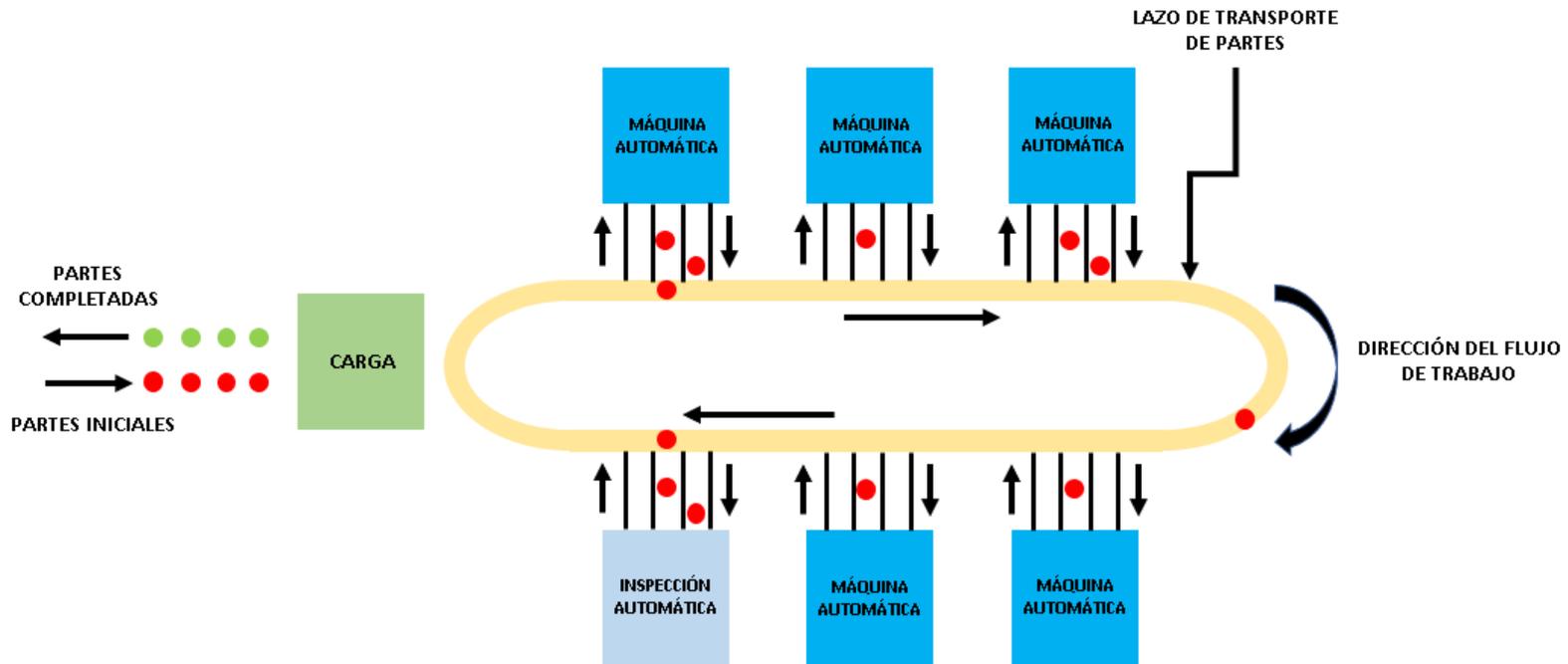


Fig. 2.3 LayOut de tipo lazo ⁽⁴⁾

- LayOut de escalera

Consiste de un lazo con anillos entre secciones recatas del lazo, entre los cuales la estación de trabajo está localizada. Los anillos incrementan los posibles caminos de ir de una máquina a la próxima y no requerir sistemas secundarios. Esto reduce la distancia promedio de viaje entre estaciones y minimiza el congestionamiento del sistema de manejo de materiales. Manejo de materiales: Sistema de banda transportadora; Sistema de vehículos guiados automáticamente; Sistema de vehículos guiados por vías.

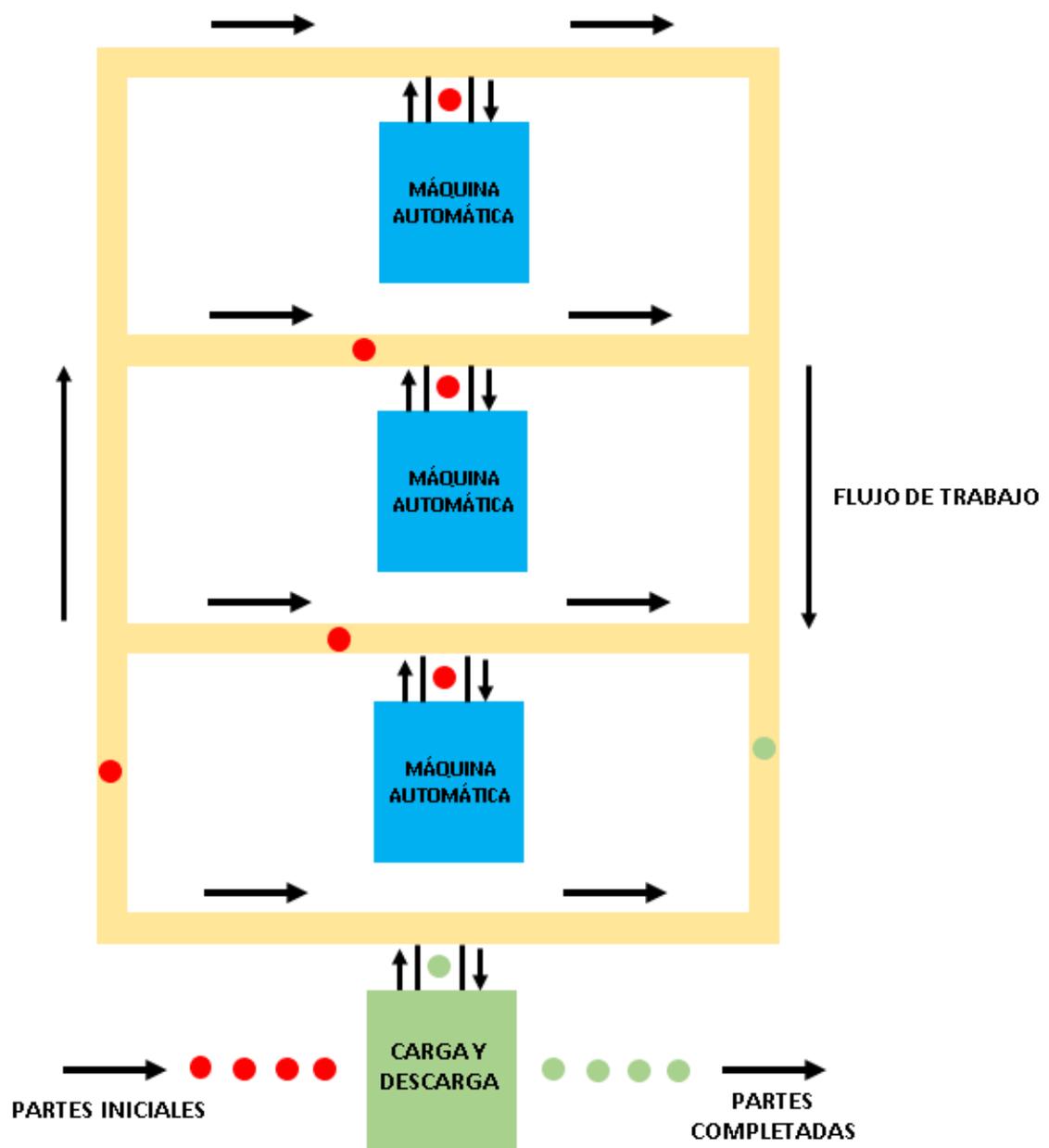


Fig. 2.4 LayOut de tipo escalera ⁽⁴⁾

- LayOut de campo abierto

Consiste en múltiples lazos y escaleras; pueden incluir caminos laterales. Este tipo de layout es normalmente apropiado para procesar grandes cantidades de familias de partes. El número de máquinas diferentes puede ser una limitante y las partes son ruteadas a diferentes estaciones de trabajo dependiendo de cual está disponible primero.

Manejo de materiales: Sistemas de vehículos guiados automáticamente; Carros arrastrados en planta.

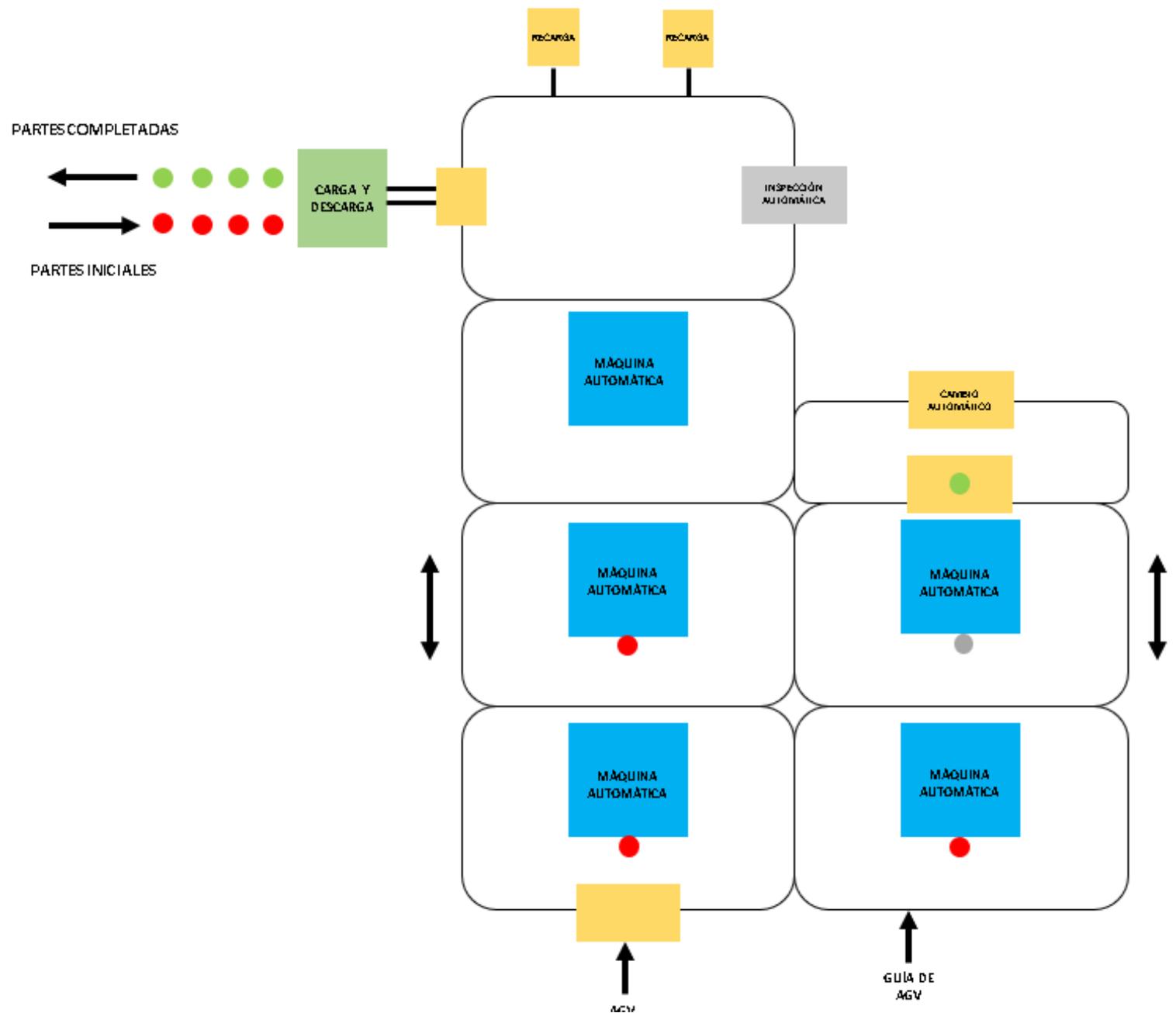


Fig. 2.5 LayOut de tipo campo abierto⁽⁴⁾

- LayOut centrada en un robot

Usa uno o más robots industriales como sistema de manejo de material. Estos robots pueden estar equipados con efectores finales que permiten un mejor manejo de partes.

Manejo de materiales: Robots industriales.

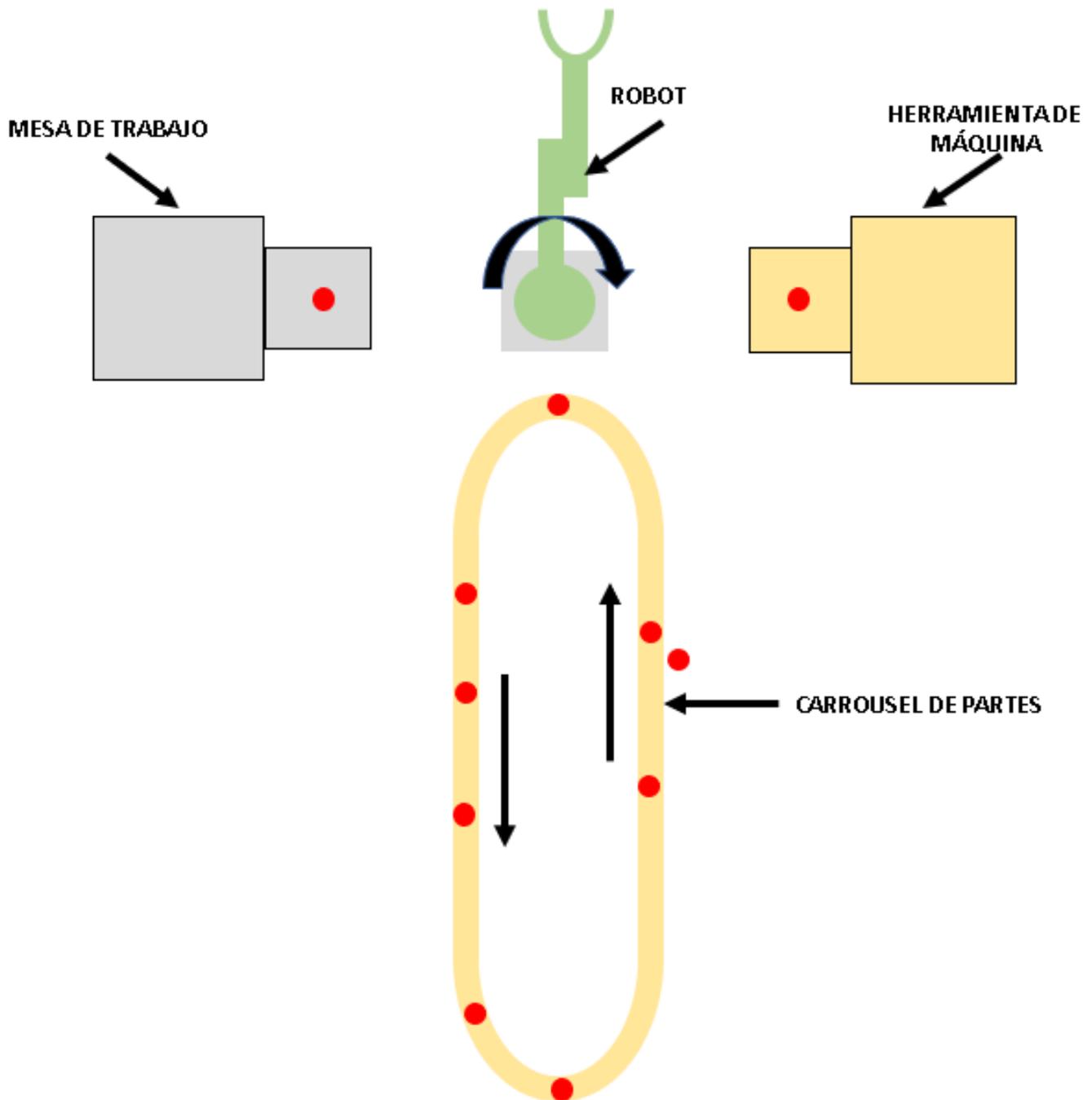


Fig. 2.6 LayOut de tipo centrada en robots ⁽⁴⁾

2.3 Actuadores inteligentes

Los *actuadores inteligentes* ^(5,6) se caracterizan por resaltar el término "*Machine Intelligence*", en donde se plantea que, no basta con que el actuador tenga características que lo definan como inteligente, sino que también es necesario que el resto de los componentes de una máquina, celda o sistema de manufactura lo sean también. Estos dispositivos están dotados de un procesador, sensores y algoritmos que producen o generan el concepto de inteligente, pues su integración se concibe de una manera más profunda, o mecatrónica, a diferencia de los actuadores convencionales, en donde el sistema mecánico es la parte principal mientras que la parte eléctrica, la que lo gobierna de manera simple.



Fig. 2.7 Actuadores eléctricos inteligentes⁽³⁷⁾

2.4 Herramientas para robots

Estos brazos robóticos tienen como características principales los grados de libertad, trayectorias y recorridos posibles, y la finalidad del uso de la herramienta ^(8,9) colocada en el final del brazo.

El uso de la robótica industrial se ha definido siempre como un sustituto de mano de obra humana, si bien además debemos tener en cuenta la posibilidad de trabajar de estos equipos en atmósferas peligrosas y poco seguras para los humanos, así como manejo de elementos pesados que fatigarían rápidamente a un operario.

En cuanto a aplicaciones, hablamos de temperaturas altas por equipos de soldadura, atmósferas irrespirables por pinturas, colocación de elementos frágiles en localizaciones exactas mediante ventosas, son algunos de los ejemplos que justifican el uso de estos robots en la industria. Los procesos más usuales que destacan en la industria son:

-
- Aplicación de pintura: El efector final empleado para este proceso es la pistola de pintura, y sus aplicaciones más destacables se dan en el ámbito automotriz.



Fig. 2.8 Efector final para pintura ⁽³²⁾

- Soldadura: El efector final empleado para este proceso es el electrodo de soldadura, y sus aplicaciones más destacables se dan en el ámbito automotriz.



Fig. 2.9 Efector final para soldadura ⁽³³⁾

- Taladrado, fresado, atornillado: Los efectores finales empleados para este proceso son el atornillador eléctrico o neumático, fresa y taladro.



Fig. 2.10 Efector final para fresar ⁽³⁵⁾

- Corte por chorro de agua: Para este proceso es necesaria la boquilla, la soportería y un sistema hidráulico de alta presión para lograr los cortes requeridos.



Fig. 2.11 Efecto final para corte de agua con abrasivo ⁽³⁵⁾

- Manipulación: Para la manipulación, encontramos los *grippers* o pinzas eléctricas y neumáticas, así como sistemas de ventosas.



Fig. 2.12 Efecto final para manipulación ⁽³³⁾

- Calidad: Para este tipo de actividades, los sistemas de visión de alta precisión permiten al robot mapear piezas o productos que requieran inspecciones detalladas para comprobar su calidad.



Fig. 2.13 Efecto final para inspección ⁽³³⁾

- Cambio rápido: Este tipo de herramienta se trata de un mecanismo ubicado en donde usualmente se coloca un efecto final, pero su función es la de sujetar y manipular otros efectos finales, siendo su característica principal la autonomía con la que dota al robot

para la ejecución de las tareas dentro de la celda. Su valor agregado es alto, y de hecho es la parte a tratar en esta tesis. Su descripción y conceptualización serán descritos más adelante.



Fig. 2.14 Efector final para cambio rápido de herramienta⁽³⁶⁾

2.5 Robots multitareas

La mayor parte de la industria converge en la asunción de que los robots son *single-tasking*, o monotarea, que, en otras palabras, significa que cada robot opera una tarea simple a la vez. Esto puede parecer razonable desde el punto de vista tradicional, pues los robots, al menos industriales, han sustituido al ser humano en tareas repetitivas y monótonas, con la garantía de la repetibilidad y eficiencia constantes que una persona pierde a lo largo de una jornada laboral. Sin embargo, resulta impráctico a la larga, pues un robot es un sistema altamente eficiente y podría ejecutar más de una tarea a la vez, claro, a través de algoritmos de control que permitan efectuarlas. En este sentido, es importante cambiar la perspectiva en cómo se observa el desempeño de los robots y adoptar posturas en las que sea razonable el uso y aprovechamiento de la infraestructura robótica para ejecutar dos o más procesos sin mayor cambio. Con esto, surge la posibilidad de habilitar a un robot como multitareas por medio de algoritmos de control adaptativo. *El robot multitareas* ^(10, 11) está basado en un *controlador adaptativo*. El controlador fuerza al sistema a comportarse como un modelo lineal de referencia, permitiendo aprender tareas que son transferidas desde otros sistemas, y se complementa con la integración sinérgica de otros dispositivos que agregan valor al proceso de manufactura, y permiten desarrollar una mayor autonomía sin la intervención de personas, incrementando así la eficiencia de la celda al enfocar esfuerzos en otros procesos mientras se ejecutan otros.

2.6 Robots multiagentes

Los *robots multiagentes* ^(12, 13) describen y comparan los esquemas actuales que gobiernan a un sistema, por ejemplo, industrial, donde en su mayoría, se trata de sistemas orientados a producción en masa, siendo estos bastante confiables y robustos para sus tareas, pero inflexibles y poco adaptables a nuevas circunstancias que podrían presentarse u ofrecerse en el mismo entorno de trabajo. En contraparte, hacen referencia a los agentes o algoritmos inteligentes que, en un entorno bien diseñado, pueden delegar tareas específicas a cada dispositivo que forme parte de su arquitectura, haciendo que la producción sea eficiente, eficaz y sobre todo, flexible, pues con ello, el mismo sistema o celda es capaz de realizar tareas distintas para las que tal vez fue pensado originalmente.

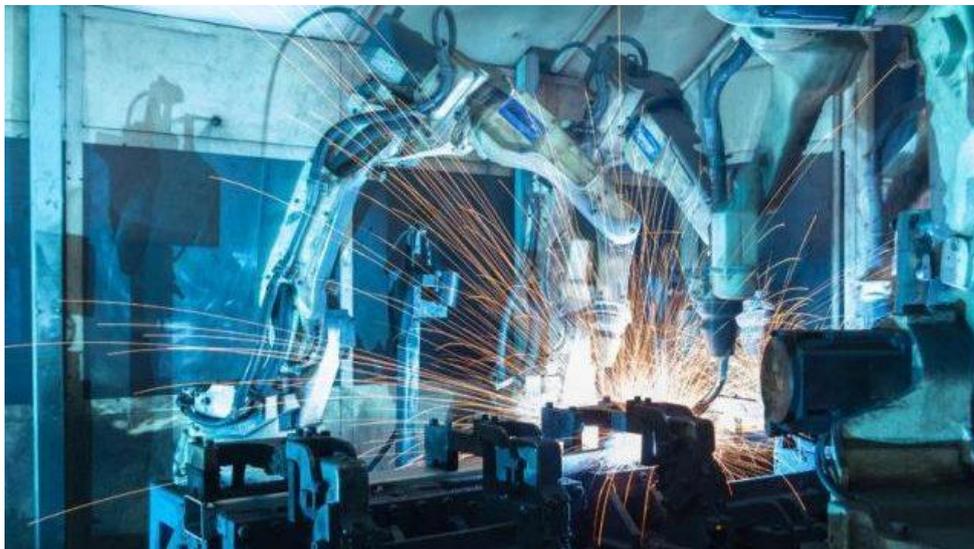


Fig. 2.15 Esquema de robot multiagente ⁽³⁷⁾

CAPÍTULO III: ESTADO DEL ARTE DE LAS MESAS INDEXADAS

En el capítulo anterior se abordó, de manera breve, los conceptos y fundamentos sobre los que está basada la mesa indexada y su entorno. No obstante, es importante resaltar los avances en la materia dados hasta el día de hoy, con la finalidad de ubicar el nivel de proyecto dentro de los estándares más avanzados en el medio.

3.1 Mecanismos indexados

Retomando la descripción del capítulo 2, un mecanismo indexado (también llamada mesa rotativa, dial o index) es un componente esencial para máquinas de ensamble o de montaje. Tal como su nombre indica, su funcionamiento está basado en secuencias de movimientos circulares en los que las piezas son desplazadas de manera continua por distintas estaciones de una cadena de trabajo o de procesos. En general, estas mesas son accionadas por un motor de corriente alterna trifásico o mediante servomotores. Para el primer caso se tomará como punto de referencia las mesas indexadas de estaciones definidas de la marca *Weiss*⁽²⁴⁾, quien es una compañía de origen alemán líder en innovación y fabricación de indexadores mecánicos de alta calidad con más de 40 años en el mercado. El tiempo que demora el indexador *Weiss* en alcanzar cada una de las estaciones es llamado tiempo de indexado. En las mesas de estaciones definidas, ese tiempo siempre es constante; así, en el caso de una máquina programada con cuatro estaciones, el tiempo para ir de 0° a 90° sería el mismo que el requerido para moverse a la estación 2 (o lo que es igual, ir de 90° a 180°). Con base en los aspectos comentados, *Weiss* cuenta con diversos equipos de indexadores de posiciones definidas, tales como los de tipo electromecánico, anillos indexadores y tipo POM⁽²⁴⁾ (*Pick O Mat*), los cuales serán descritos a continuación.

La mesa electromecánica permite montar un plato para aplicaciones con un número considerable de elementos que se van a usar en el proceso. El modelo TC de *Weiss* permite el movimiento de los nidos en el sentido horario o antihorario, según la polaridad del motor.

Los anillos indexadores ofrecen un alto nivel de precisión y tienen una apertura central amplia, lo cual ofrece espacio suficiente para integrarse con robots industriales, colaborativos u otros tipos de herramientas.

La máquina de montaje automático POM (*Pick-O-Mat*) es una máquina de ensamble, cuyos ejes realizan movimientos coordinados. *Weiss* diseñó el ensamblaje para que pueda ser integrado

dentro de otras máquinas y, mediante el uso de sus sistemas *Pick & Place*, adaptarse a diferentes procesos de ensamble.



Fig. 3.1 Mesas de estaciones definidas Weiss⁽²⁴⁾

En cualquier caso, los equipos de indexado de estaciones definidas de *Weiss* funcionan con una leva en la cual se maquinan suaves rampas de aceleración que permiten transiciones sin impactos durante todo el ciclo. Adicionalmente, tienen un sensor de posición que detecta cuando nos encontramos en la sección plana de leva, también llamada sección de seguridad; esto permite detener el equipo sin ningún riesgo de sobrecarga.

Para el segundo caso, es decir, para las mesas indexadas actuadas por servomotor, se tomará como punto de comparación las fabricadas por la compañía italiana *CDS*⁽²³⁾ (*Cam Driven Systems*), cuya presencia en el mercado la ha hecho una de las mayores referencias en cuanto a precisión se refiere. En específico se abordará la serie *IT*, entre cuyas características se encuentra un gran número de estaciones programables (2 a 32), una gran capacidad dinámica (10 a 5500 Nm), gran capacidad de resistencia en cuanto a momentos axial y radial, etc. La tecnología '*friction followers*'⁽²³⁾ utilizada internamente garantiza ausencia de vibraciones y de juegos incluso a alta velocidad, alta precisión y repetibilidad de posicionamiento, junto a una larga vida operativa sin tareas de mantenimiento. El mecanismo de mesa indexada de este proyecto de tesis está inspirado conceptualmente en este último tipo de dispositivo comercial, guardando muchas similitudes, pero dando pie a la originalidad en el diseño y adaptabilidad.



Fig. 3.2 Mesas de estaciones programables CDS⁽²³⁾

3.2 Manufactura avanzada

De acuerdo con lo descrito en el capítulo anterior, existen diferentes configuraciones de celdas de manufactura, y cada una diseñada específicamente para un tipo de producción, proceso o fase dentro de un esquema de producción global en una compañía. De acuerdo con esta última idea, a continuación se describen algunas de estas celdas tomando ejemplos reales que actualmente se aplican en la industria.

3.2.1 Celdas de producción en línea

La tecnología de *celda en línea recta* ⁽²⁸⁾ es una técnica de manufactura en la que las partes que la conforman poseen la característica de estar colocadas en línea recta, cada una realizando y ejecutando un proceso distinto al producto que se esté trabajando. Dicha celda puede estar compuesta por robots, manipuladores neumáticos, transportadores sinfín o indexados, dispositivos de ensamble como manipuladores, dispositivos formadores de cajas o empaquetadores. Es el tipo de celda más usual en la industria. Como ejemplo tomaremos el proceso de ensamble de un automóvil. Al inicio del proceso, se reciben las piezas o componentes para su clasificación, dado que en la mayoría de los fabricantes de automóviles maquilan sus piezas en otras plantas. Posteriormente se realiza el corte de piezas metálicas acordes al diseño o modelo de auto. Después se procede con el ensamble del chasis y carrocería con ayuda de robots manipuladores y fuerza laboral humana; en el proceso siguiente se aplica pintura, también con ayuda de robots. Una vez pintado se ensamblan otras partes mecánicas, tales como asientos, faros, molduras, etc. En el siguiente proceso se detallan acabados exteriores, después interiores. Casi al final se ejecuta una verificación y al final, las pruebas de validación del vehículo. Este tipo de celda de producción tiene la característica de que se puede estar produciendo un vehículo tras otro, sin tener que atender uno a la vez. En el caso de *FORD Motors*, por ejemplo, su cadena de producción, bajo el esquema anterior, se basa también en la mejora continua, integrando un *sistema lean FPS* ⁽²⁹⁾ de producción global, flexible y disciplinado que abarca un conjunto de principios y procesos para impulsar un ambiente de manufactura esbelta o lean manufacturing.



Fig. 3.3 Celda de producción en línea ⁽²⁹⁾

3.2.2 Celdas de tecnología de grupos

La *tecnología de grupos* ⁽²⁶⁾, o TG es una técnica de manufactura en la que las partes que la conforman poseen similitudes en geometría, procesos de manufactura y/o funciones que son manufacturadas en una ubicación usando un pequeño número de máquinas o procesos. La tecnología de grupos se basa en el principio general de que muchos problemas son similares y al agruparlos, es posible encontrar una solución simple, con lo que se ahorra tiempo y esfuerzo. El grupo de partes similares se llama "*familia de partes*" y los grupos de máquinas usadas para procesar una familia de partes es conocida como "*celda de máquinas*". Dicha aproximación es usada actualmente por una compañía de origen costarricense llamada *ROBOTICS AND CNC* ⁽²⁷⁾ y su sistema propuesto es una celda de manufactura de cuatro robots que trabaja en conjunto con una fresadora CNC y utiliza un carrito *Cert* ⁽²⁷⁾ de máquina *MTEC* y tres bases de carritos *LR Mate Cert* ⁽²⁷⁾, modificados para realizar las tareas descritas. Esta celda destaca la tecnología de maquinado, utiliza un centro de maquinado vertical CNC de 3 ejes. Cada estación tiene su propio PLC, HMI, robot y estación de aprendizaje. Las estaciones se pueden unir como una línea completa, lo cual refleja el proceso de manufactura real cuando distintos programadores y empleados trabajan juntos para completar un proyecto grande. El proceso es completamente autónomo y utiliza la robótica inteligente de FANUC con visión ⁽²⁷⁾, PLC de Rockwell Automation, tecnología de sensor inteligente *IO Link*, y seguimiento de procesos RFID. La celda manipulará todos los materiales y tareas de manufactura para crear el artículo de promoción sin necesidad de interacción humana. Para realizar estas tareas, existen estaciones de trabajo, conocidas en la industria como *OP* ⁽²⁷⁾. Cada *OP* es una estación robótica modular con objetivos de proyecto específicos y dispositivos auxiliares. Cada estación de trabajo *OP* es controlada por un panel de control PLC adjunto al carrito robótico con comunicación vía *IP Ethernet* (protocolo industrial Ethernet) de celda a celda para operar como un sistema integrado completo. Desde la interfaz de control maestra de la celda se establece el programa de operación de producción. Esto incluye información como grabado láser, conteo de lotes, cantidad de paquetes, etc. El material se carga al sistema y la celda realizará todas las tareas de manera autónoma.



Fig. 3.4 Celda de tecnología de grupos ⁽²⁷⁾

3.2.3 Celdas funcionales

Las celdas funcionales ⁽⁴⁾ se caracterizan por mantener unidas a las máquinas y equipamientos de acuerdo con su tipología, es decir, se disponen agrupando a las que son iguales o semejantes. Por ejemplo, si en una fábrica se tienen sierras, estas se unen, independientemente de su tamaño y capacidad, al igual que soldadoras, centros de mecanizado, prensas de montaje, etc. Cada grupo funcional cuenta con su responsable y su equipo de trabajo, que se especializan en esa tipología de máquinas o instalaciones: su manejo, el control de calidad de sus piezas, su mantenimiento, entre otras cosas. Como ejemplo de este tipo de celda, se tomará la producción realizada en una de las plantas de Eaton ⁽³⁰⁾, compañía dedicada a la fabricación de dispositivos eléctricos, principalmente. En esta planta, ubicada en el estado de México, la producción está agrupada de manera funcional, es decir, de los grupos de productos que se fabrican ahí, cada uno tiene su segmento de planta en donde se ubican las máquinas iguales o similares que los producen. Por ejemplo, las terminales eléctricas tienen una zona denominada "BODINES", y ahí únicamente se fabrica este producto. Existe otra zona, denominada "LAMP HOLDER" en donde un grupo de máquinas similares, fabrican lámparas eléctricas. Esta planta es un claro ejemplo de este tipo de manufactura funcional.



Fig. 3.5 Celdas funcionales ⁽³⁰⁾

CAPÍTULO IV: DISEÑO MECÁNICO DE LA MESA INDEXADA

El concepto de cambio rápido ya se ha revisado anteriormente. No obstante, es importante detallar en qué consiste y qué funciones cubrirá, dado que se trata de un complemento muy importante para la mesa indexada y su objetivo de dotar a la celda de autonomía y continuidad en los procesos de manufactura. Se trata de un dispositivo que permitirá interactuar de manera directa y sencilla al robot y a la mesa indexada a través de la estandarización de herramientas en cuanto a dimensiones y masa se refiere.

4.1 Descripción global de la mesa indexada

La mesa indexada, como ya se ha mencionado, se trata de un proyecto generado a raíz de la necesidad de proveer con herramientas distintas a un robot industrial dentro de una celda de manufactura con la finalidad de que este pueda cubrir una amplia gama de procesos de manufactura de manera autónoma siguiendo la ejecución de un algoritmo sin la intervención de una persona para cambiar y ajustar la herramienta cada que esta se cambie. Siguiendo esta lógica, la integración de la mesa a la celda debe llevarse a cabo de manera estratégica, de modo que el robot pueda tomar una herramienta, llevarla a la zona de trabajo y regresarla al terminar en una posición convenientemente predeterminada, incrementando así la efectividad y ahorro de movimientos que este pudiera realizar. Para reforzar lo anterior, a continuación se mencionará de manera general, cada una de las partes principales que conforman la mesa indexada.

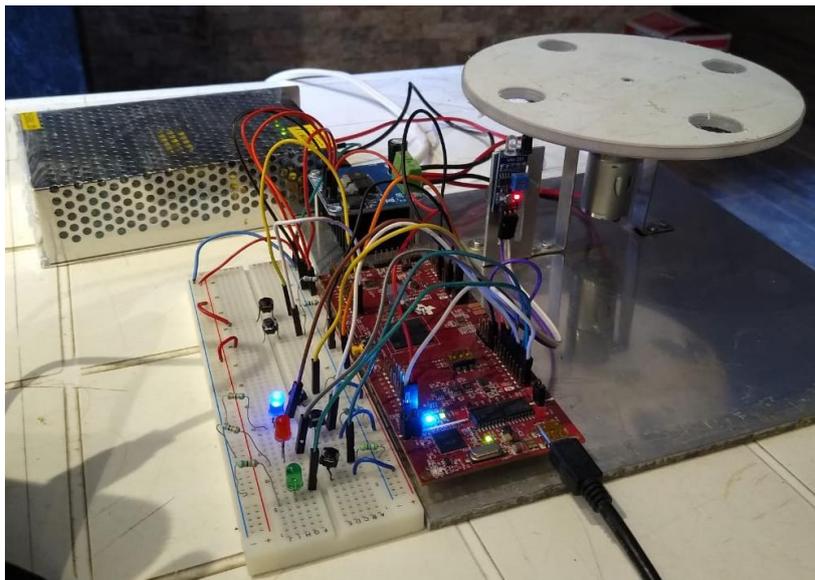


Fig. 4.1 Concepto inicial de la mesa indexada

4.2 Chasis o estructura

Está conformado por perfil de aluminio estructural anodizado de 45 mm, convenientemente diseñado para el uso en celdas robóticas. Por su facilidad de manejo, es realmente sencillo crear estructuras resistentes y rígidas que permitan colocar grandes cargas, siendo tan confiables como las hechas con acero y soldadura. Además, las patas niveladoras permiten alinear su contenido de manera más sencilla. La descripción detallada de este sistema se da más adelante en este capítulo.



Fig. 4.2 Chasis de la mesa indexada

4.3 Plato giratorio

El plato giratorio es una parte básica de las mesas indexadas, y es donde se soportan los productos, herramientas o procesos que se ven involucrados en una celda de manufactura. Está hecho de aluminio, y tiene capacidad para almacenar hasta seis herramientas distintas. La descripción detallada de este sistema se da más adelante en este capítulo.

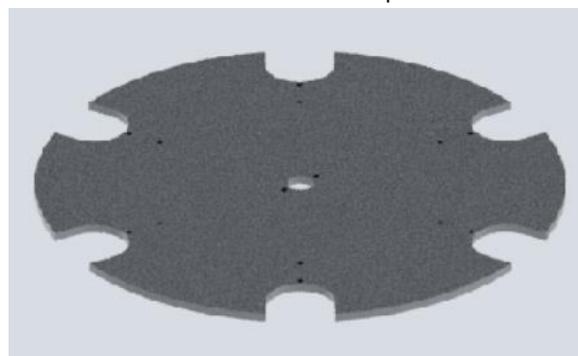


Fig. 4.3 Plato giratorio

4.4 Transmisión mecánica

Es la parte motriz del sistema, y el cual lleva a cabo las pautas o indexaciones del mecanismo. Está conformado por poleas dentadas, baleros y banda dentada, con relación 1:3 de par motor para garantizar el óptimo funcionamiento durante el tiempo de ejecución, así como por un sistema de baleros para el manejo de momentos. La descripción detallada de este sistema se da más adelante en este capítulo.



Fig. 4.4 Transmisión mecánica

4.5 Sistema eléctrico-electrónico

Es el sistema medular del proyecto, el sistema electrónico que dará vida a la mesa indexada. Se trata de un sistema comandado por un DSP, entradas y salidas a la medida y correctamente adecuadas para el manejo de señales externas, comunicación con dispositivos móviles, etc., el cual proveerá al mecanismo con las facultades necesarias para poder acatar algoritmos de manufactura, y con los que el robot desempeñará tareas específicas de manera continua, con mayor repetibilidad y sobre todo, autonomía. La descripción detallada de este sistema se da en el capítulo V. Adicionalmente se anexan los planos eléctricos al final de este documento para un mejor entendimiento del lector.



Fig. 4.5 Conjunto de sistema eléctrico-electrónico de la mesa indexada

4.6 Parámetros cinemáticos y dinámicos para el diseño de la mesa index

Hasta ahora se ha comentado, de manera general, en qué consiste la mesa indexada, sus objetivos y sus partes fundamentales. Se ha hecho hincapié en la importancia de la parte electrónica y sus contribuciones a la celda, pero no es menos importante hacer mención de la parte mecánica, y en cómo se concibió y diseñó a partir de sus fundamentos científicos. Es así como se presentará a continuación, de manera concisa y concreta, los parámetros cinemáticos y dinámicos tomados en cuenta para su diseño.

4.7 Cálculo de la transmisión mecánica de la mesa indexada

Para el cálculo de la potencia del motor y transmisión mecánica de la mesa indexada, es importante el material utilizado, por lo que se han escogido los materiales de la tabla 4.1, basados en experiencias de diseños similares.

Concepto	Material	Masa
Plato giratorio	Aluminio 6061	1.73 kg
Buje del plato	Acero 1045	0.15 kg
Herramientas del robot (x6)	Compuesto	1 kg c/u (6 kg)
Flechas de transmisión	Acero 1018	0.5 kg
Poleas dentadas	Acero 1018	1.1 kg

Tabla 4.1 Materiales para construcción de mecanismo indexado

Otros factores importantes son la velocidad y los tiempos de paro y arranque que debería cumplir el mecanismo, y de acuerdo con la curva trapezoidal que se propone para este proyecto mostrada en la fig. 4.6.

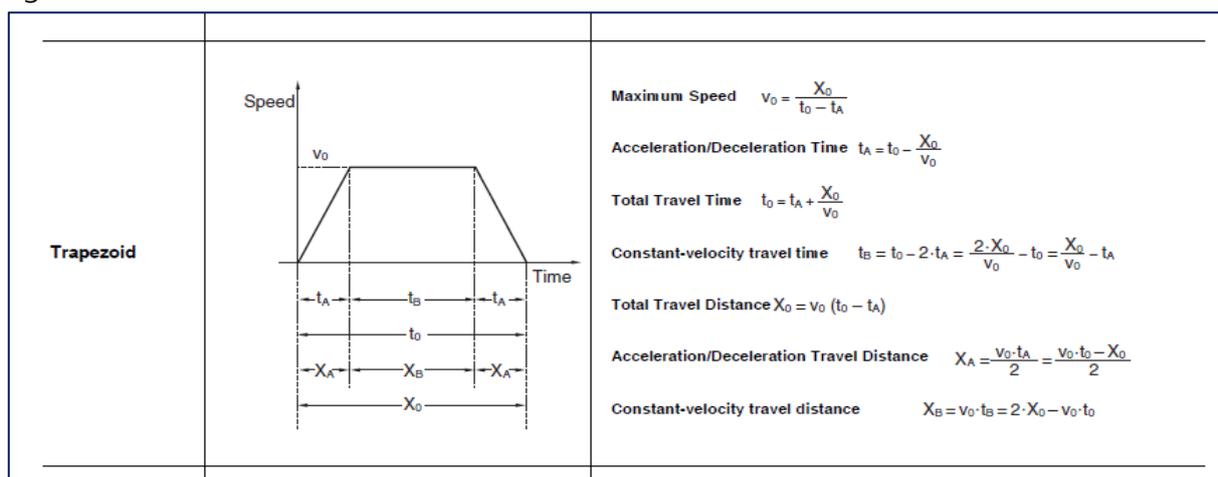


Fig. 4.6 Perfil de velocidad trapezoidal considerado para la mesa indexada ⁽¹⁵⁾

Los parámetros requeridos para el funcionamiento de la mesa indexada y basados en la integración a la celda de manufactura en la que será integrada, son:

Concepto	Cantidad	Unidad
Diámetro de circunferencia primitiva	0.34	Metro
Ángulo de recorrido	1.047	Radián
Distancia de indexación	0.178	Metro
Tiempo t0	1.8	Segundo
Tiempo TA	0.20	Segundo
Velocidad lineal máxima	0.11	Metros / Segundo

Tabla 4.2 Parámetros de funcionamiento propuestos para el mecanismo indexado

La tabla 4.3 muestra de manera resumida los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones relacionadas con el movimiento rotacional, necesarios para estimar el par necesario para mover al plato giratorio. Todos los cálculos se anexan al final de esta tesis.

Concepto	Cantidad	Unidad
Radio	0.17	Metro
Velocidad angular	0.65	Radianes / Segundo
Velocidad en revoluciones	5.55	RPM
Aceleración en RPM	6.24	RPM/ Segundo
Aceleración angular total	3.27	Radianes / Segundo**2

Tabla 4.3 Parámetros de velocidad y aceleración angulares del plato

Con ayuda de estos valores, se procede a calcular la potencia eléctrica que debería tener el motor para poder cumplir con los requerimientos de la inercia generada por los componentes y materiales. Para este cálculo se empleó el software de diseño mecánico, *SolidWorks*³⁹, con el cual se obtuvieron los valores de inercia máximos de acuerdo con lo desplegado en la tabla 1.

Concepto	Cantidad	Unidad
Inercia del mecanismo	0.44	Kilogramo / metro**2
Par del plato	3.72	Newton*metro

Tabla 4.4 Parámetros de inercia y par motor

Donde el momento de inercia se obtiene haciendo el producto de Inercia por aceleración angular.

$$M = I\alpha \dots (4.1)$$

El cálculo del par motor es un parámetro importante para la selección del motor, así como también su potencia. Para obtener la potencia, solo hay que calcular el producto entre el par motor y la velocidad angular, la cual ya se calculó previamente. Esto resulta en:

$$P = M\omega \dots (4.2)$$

para el caso de un mecanismo giratorio, queda como:

$$P = M\omega = \frac{Mn}{60/2\pi} \dots (4.3)$$

donde n son las revoluciones por minuto, sustituyendo los parámetros en la ecuación anterior, la potencia eléctrica mínima requerida por el motor es la que se muestra en el siguiente cálculo:

$$P = \frac{3.72[Nm] * 6.24[RPM]}{60[s]/2\pi} = 2.43 [W]$$

Para la selección del voltaje de operación, que en este caso son 12 VDC, el requerimiento de corriente eléctrica es el siguiente.

De la ecuación (2), igualamos potencia mecánica con potencia eléctrica y se despeja **I**:

$$P = M\omega = VI \rightarrow I = \frac{P}{V}$$

Sustituyendo valores, nos da que la corriente necesaria para el motor es de:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{2.43[W]}{12 [V]} = 0.20 A$$

Finalmente, lo que queda es seleccionar las características del motor adecuado para este mecanismo de acuerdo con las especificaciones antes calculadas y considerando una relación de transmisión de 1:3.

Requerimiento mínimo	Cantidad	Unidad
Inercia del motor	0.15	Kilogramo / metro**2
Par motor	1.24	Newton*metro
Velocidad	5.55	RPM
Potencia	2.43	Watts
Voltaje	12	Volts
Corriente	0.20	Amperes

Tabla 4.5 Especificaciones mecánicas y eléctricas mínimas del motor del mecanismo

4.8 Manufactura de la mesa indexada

Los parámetros calculados en el punto anterior dan pie a finalmente concebir, conceptualizar, diseñar y detallar la mesa indexada, estableciendo funciones, geometrías y dimensiones tangibles y proyectables para su fabricación. Las herramientas de diseño, tales como las CAD, son de vasta importancia para poder plasmar, de una manera más enfática, y por supuesto, gráfica, lo que se ha venido explicando en capítulos anteriores. La siguiente figura muestra, de una manera ordenada y entendible, las dimensiones generales de la mesa indexada.

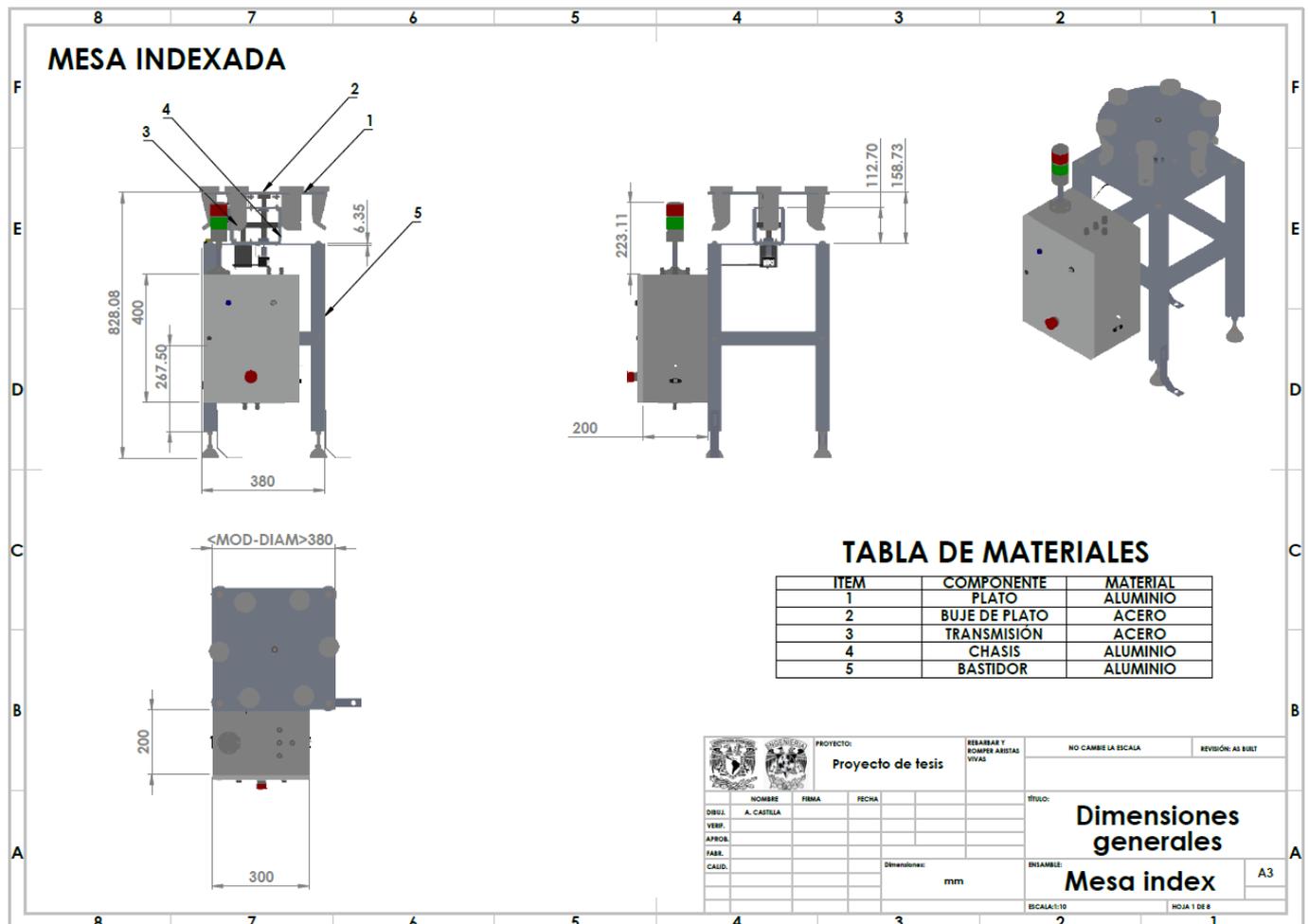


Fig. 4.7 Dimensiones generales de la mesa indexada

Derivado de los cálculos obtenidos en la sección 4.7, en la tabla 6 se muestran los componentes mecánicos empleados para el desarrollo del dispositivo, con la finalidad de respaldar lo arrojado por el diseño mecánico.

Concepto	No. Serie	Marca	Especificaciones
Perfil de aluminio	MK-2040.40	MK	Perfil de aluminio anodizado de 40 mm Accesorios: Tuercas, tornillos
Plato giratorio	6061	N/A	Diámetro de plato: 40 cm Posiciones: 6 Buje de acero
Chasis	6061	N/A	Placa superior e inferior: Postes: Soportes para balero
Transmisión ⁽¹⁶⁾	L050	MARTIN	Polea primaria: 10L050 Polea secundaria: 30L050 Banda dentada: 150L050 Baleros autoalineables: 2202-2RS-TVH Flechas: acero 1018
Patas	LAM-3025HB-M12	APT	Material: Acero inoxidable Carga: 50 kg / pata
Cilindro neumático	ESNU-8-10-P-A	Festo	Diámetro: 8 mm Carrera: 10 mm Tipo: Simple efecto

Tabla 4.6 Componentes mecánicos de la mesa indexada

Los planos de diseño mecánico, fundamentales para poder ejecutar una manufactura adecuada, serán anexados al final de este documento para disposición del lector y un mejor entendimiento de la concepción del dispositivo.

La manufactura de la mesa es resultado del diseño pensado, planeado y correctamente ejecutado, de manera integral en todos sus módulos. Las imágenes siguientes certifican que dicha manufactura se logró correctamente de acuerdo con bases bien definidas y fundamentadas en el inicio de este proyecto de tesis.

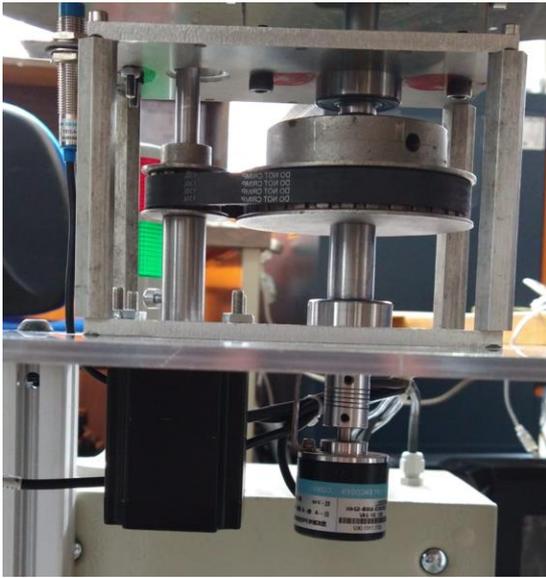
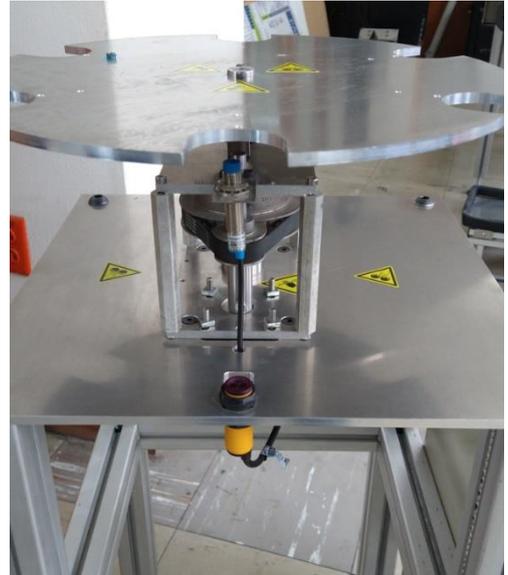


Fig. 4.8 Manufactura y ensamble de mesa indexada

4.9 Implementación de la mesa indexada a la celda de manufactura

Los requerimientos de diseño mecánico estuvieron también en función de las necesidades, requerimientos y dimensiones del robot, con lo que su conceptualización estuvo fuertemente basada en sus características y límites espaciales según el manual del robot, satisfaciendo así los puntos necesarios para poder integrar la mesa indexada de manera óptima. La siguiente figura ilustra la implementación en el área de trabajo del robot. Más adelante se detallará la integración por módulos funcionales.



Fig. 4.9 Implementación de la mesa indexada a la celda de manufactura

4.10 Parámetros para el diseño mecánico del cambio rápido

La premisa sobre la que descansa el concepto de cambio rápido se basa, como ya se mencionó, en la idea de la estandarización. Pero en este contexto, ¿a qué se refiere la estandarización? Simple y sencillamente al modo en que el robot va a tomar la herramienta y como es que la va a depositar nuevamente en la mesa indexada. Para dar una mejor explicación, se abordará de manera gráfica el concepto de cambio rápido.

La figura 4.10 describe el concepto de cambio rápido, el cual consiste en el diseño de un muñón atornillable que será parte del último eje del robot, o *end effector*, y la cual esta complementada con un actuador neumático y un mecanismo interno que se abre o se cierra dependiendo del accionamiento de un sistema neumático en la celda.

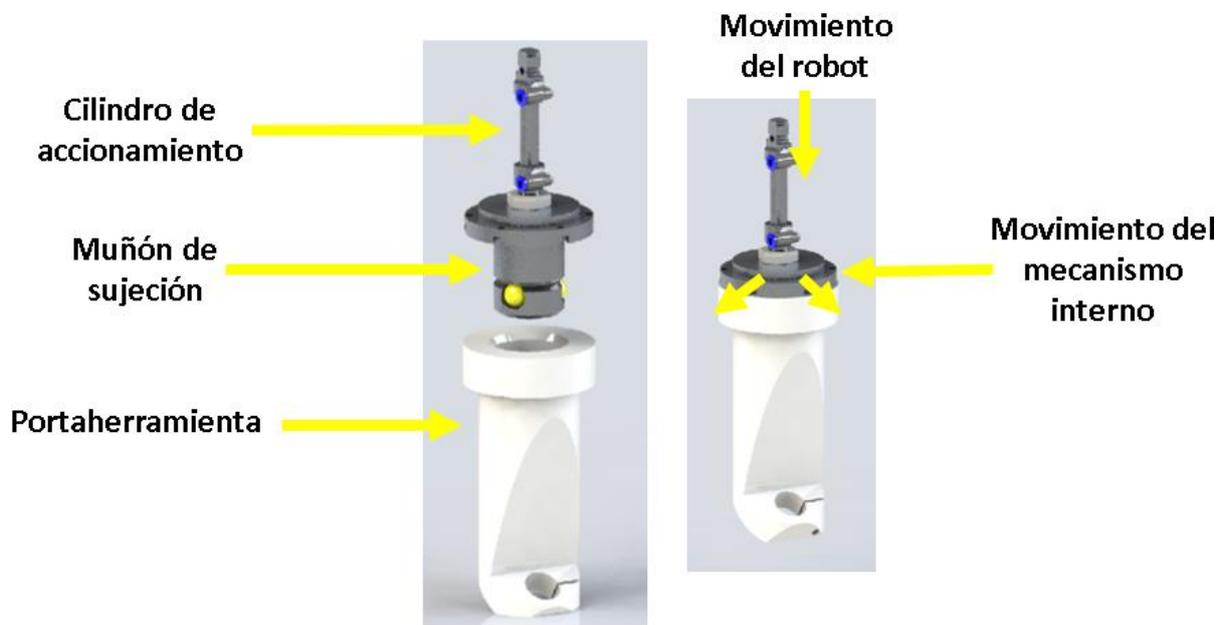


Fig. 4.10 Cambio rápido

El portaherramienta es en donde el muñón se ensambla de manera momentánea y en donde descansa la herramienta o herramientas del proceso (para este proyecto se utilizaron plumones como objeto de prueba). Este componente posee un maquinado oculto a la vista, que encaja perfectamente con el mecanismo interno del muñón, el cual está compuesto por balines que saldrán o permanecerán en el *housing* dependiendo del movimiento del cilindro, permitiendo ejecutar la función de *SWITCH-RELEASE* necesaria para el desempeño del robot en la celda de manufactura, tal como se muestra en la fig. 4.11.

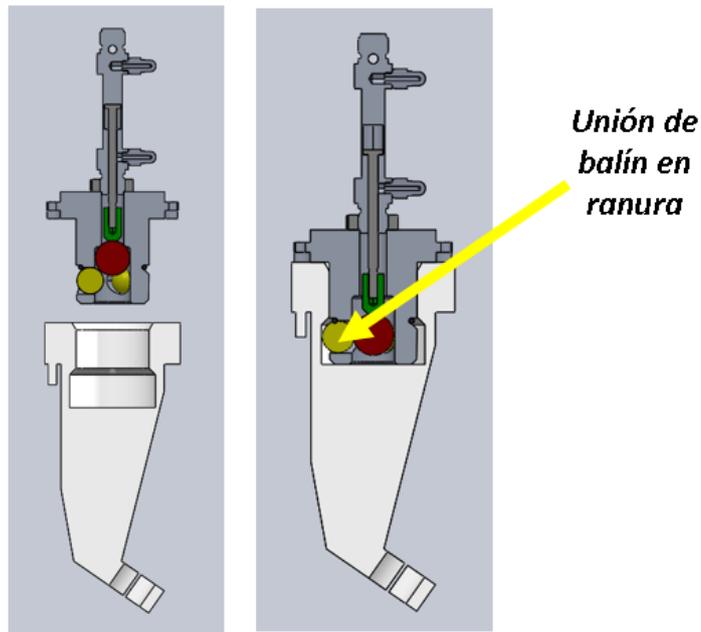


Fig. 4.11 Conexión de muñón y portaherramienta (vista lateral interna)

La figura anterior muestra cómo es que el muñón se posiciona sobre el portaherramienta, desciende en línea recta y al estar en posición, se acciona el mecanismo interno actuado por un cilindro neumático, sujetándolo y por lo tanto, sujetando la herramienta a emplear. El nivel de precisión de esta actividad debe ser máximo, por lo que las piezas deberán estar muy bien manufacturadas y dimensionadas para así lograr el éxito de la tarea. La figura 4.12 ejemplifica de manera gráfica el detalle de precisión con el que deberá cumplir este sistema.

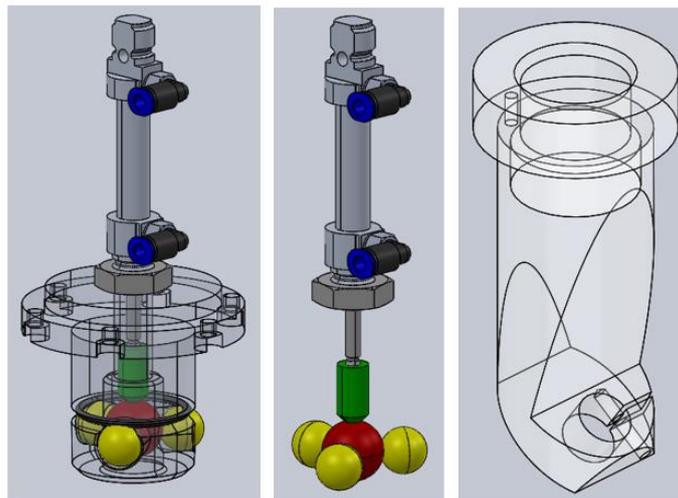


Fig. 4.12 Detalle del cambio rápido y portaherramienta

Finalmente, se muestra en la figura 4.13 como es que se integra este sistema al robot, y en sí, a la celda de manufactura. Cabe destacar que el muñón de sujeción debe cumplir con ciertas características físicas para poder atornillarse al robot, así como condiciones mínimas de peso para evitar malfuncionamiento en el brazo, y lo cual fue tomado en cuenta para su diseño.

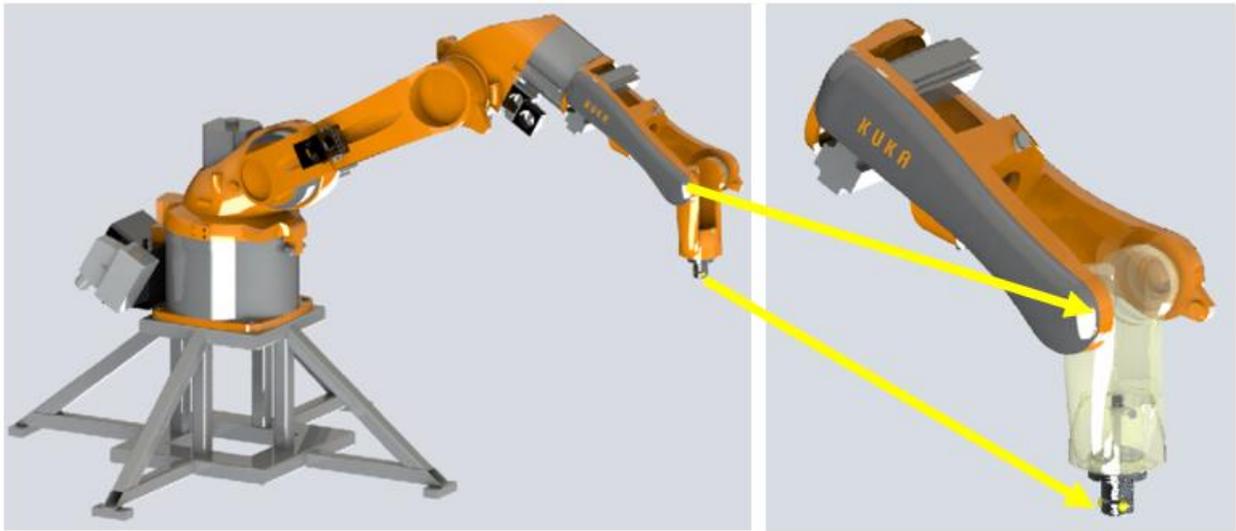
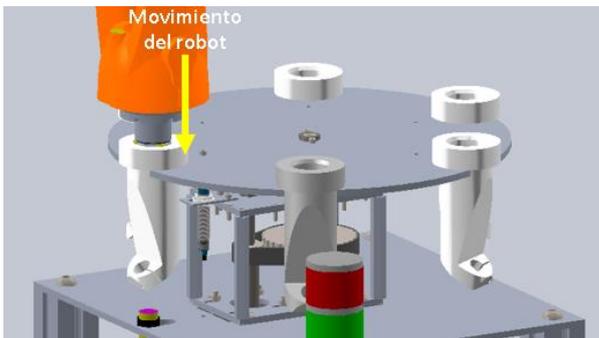


Fig. 4.13 Detalle del cambio rápido en robot

En la figura anterior se muestra cómo y dónde debe ir acoplado el muñón de sujeción. En la figura 4.14 se visualiza como operará desde la posición de inicio, una vez ensamblado al robot y trabajando en conjunto con la mesa indexada. En esta actividad, el robot deberá siempre buscar una posición de inicio con respecto a la mesa indexada, y está en consecuencia operará en función de esa posición para acercar la herramienta requerida en el algoritmo.



a)



b)



c)

Fig. 4.14 Detalle del cambio rápido en celda: a) Diseño; b) Manufactura; c) Implementación

4.11 Especificación de diseño del cambio rápido

Hasta este punto ya se tiene el antecedente del cambio rápido y en qué consiste. Sin embargo, no se han especificado aun sus características físicas, tales como dimensiones, masa y material. En este apartado se describirá cada uno de estos conceptos de manera breve y concisa.

4.2.1 Dimensiones del cambio rápido

El mecanismo de cambio rápido consta de una serie de componentes mecánicos que, en su conjunto, logran plasmar un ensamble esbelto y preciso que será parte del muñón del robot para ayudarle en la ejecución de las tareas de pick and place. La siguiente figura ilustra las dimensiones generales del dispositivo, así como sus componentes. Al final de este documento será anexado el set de planos de manufactura del cambio rápido para disposición del lector y un mejor entendimiento de la concepción del dispositivo

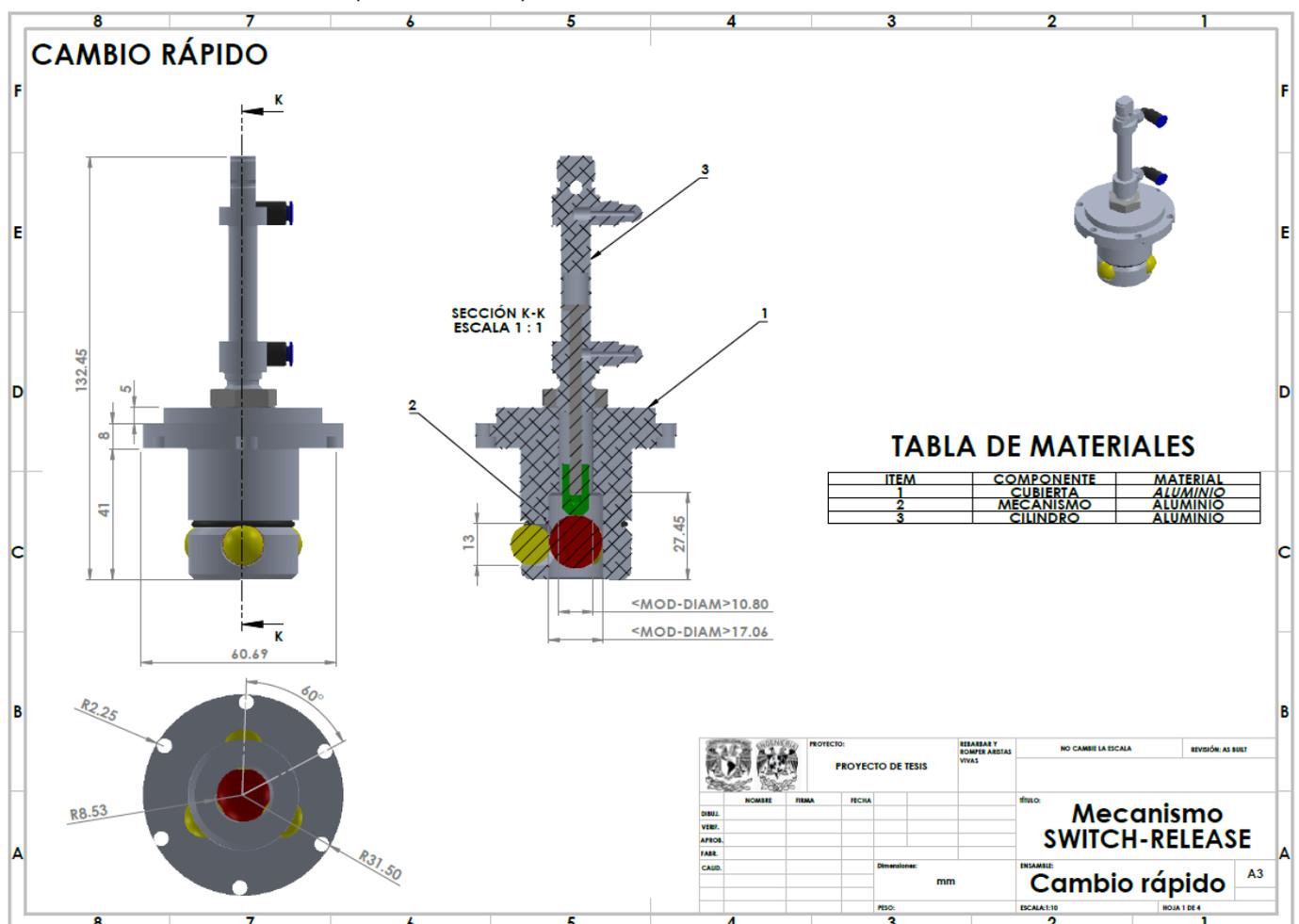


Fig. 4.15 Dimensiones generales del cambio rápido

4.2.2 Masa del cambio rápido

El robot KUKA KR5 cuenta con una serie de especificaciones que deben ser seriamente acatadas para garantizar así su correcto funcionamiento. Una de ellas es la carga que puede mantener en su órgano terminal, que es de 5 kg. Esto deja abierta la posibilidad para decidir dónde y cómo estará distribuida la masa de los componentes que el robot cargará para ejecutar tareas con la mesa indexada. Por un lado se tiene el mecanismo de *SWITCH-RELEASE*, y por el otro, el muñón de sujeción con su herramienta correspondiente. Con estas restricciones en la mesa, se decidió que el mecanismo de *SWITCH-RELEASE*, en conjunto con el actuador neumático, posea una masa no mayor o igual a 1 kg, para dar oportunidad al robot a poder manipular mayor carga del lado de la herramienta a emplear. Con una masa de 1 kg se garantiza el correcto desempeño del robot sin perjudicar sus condiciones. El criterio de 1/5 del peso utilizado para la herramienta es obtenido de la información de sistemas similares utilizados en manufactura.

4.2.3 Material del cambio rápido

El punto anterior se desprende, en mayor medida, del material del que está fabricado el mecanismo. Para esta actividad, y revisando propiedades mecánicas de distintos materiales, se llegó a la conclusión de que el aluminio poseía las características idóneas para este componente, entre otras cosas, por su buena dureza y ligereza en comparación con los aceros, además de una mayor facilidad para manufacturarlo y detallarlo. Hay que tener en cuenta que el robot se encuentra en un ambiente académico, que no está sujeto al rigor industrial y a las exigencias a las que podría estarlo, por lo que el aluminio cumple a la perfección con este papel.

Propiedades físicas	
Densidad	2.7 g/cm ³
T de fusión	660°C
T de ebullición	2467°C
Conductividad térmica	238 W/m-K
Conductividad eléctrica	64% IACS
Propiedades mecánicas	
Módulo de elasticidad	70 GPa
Resistencia a la tracción	700 MPa
% de elongación	60

Tabla 4.7 Propiedades mecánicas del aluminio

4.12 Manufactura del cambio rápido

Existen diferentes métodos para la fabricación de este mecanismo, como lo son la manufactura convencional, la manufactura avanzada (CNC) y la manufactura aditiva. Esta última representa ventajas interesantes sobre las otras dos, como por ejemplo, la rapidez de prototipado, pruebas más rápidas y deliberaciones más precisas a la hora de elegir piezas o componentes para un sistema. Sin embargo, aún resulta difícil su adopción en la industria debido a que no llega a cumplir con algunas características, como robustez, y así cumplir cabalmente con los conceptos de durabilidad y precisión. Es por ello que para este caso se optó por la fabricación avanzada con CNC, dado que conceptos como precisión y durabilidad son requeridos para la ejecución de las tareas de *SWITCH-RELEASE* del robot, como se ilustra en la fig. 4.16. Ahora bien, para la parte del muñón de sujeción no hay tanto problema si se utiliza la manufactura aditiva, pues se trata de un sistema conceptual que permitirá evaluar el funcionamiento de la mesa indexada, sin necesidad de cumplir un rol funcional dentro de las pruebas preliminares.



Fig. 4.16 Mecanizado CNC del aluminio para cambio rápido

4.13 Implementación del cambio rápido en robot KUKA KR5

La figura 4.17 ilustra el resultado final de la implementación del mecanismo rápido con el robot. La sujeción se llevó a cabo mediante 6 tornillos M4 para un agarre uniforme, y el cilindro neumático se conectó a una electroválvula de 24 VDC, la cual está montada en el robot y es actuada desde una salida digital de este; el suministro de aire se debe gracias a un compresor estándar. El cilindro se actúa cuando el robot llega a la posición correcta dentro del muñón de sujeción, y mediante lecturas de posición es como la señal digital se activa y a su vez, esta activa a la electroválvula.

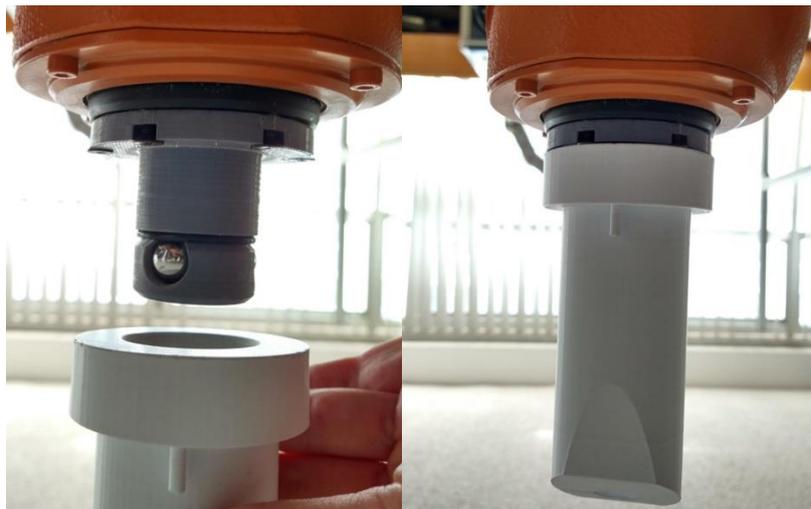


Fig. 4.17 Implementación del cambio rápido

CAPÍTULO V: DISEÑO ELECTRÓNICO DE LA MESA INDEXADA

Hasta este punto se ha explicado brevemente el trabajo concerniente al aspecto mecánico del proyecto, y esto es debido, entre otras cosas, a que el objetivo de este proyecto de investigación es el de desarrollar un sistema embebido que sea, por supuesto, funcional, pero además útil y que agregue valor a la celda de manufactura para el cual fue concebido. Bajo esta premisa, lo que sigue a continuación es una explicación de lo realizado para este módulo del sistema.

5.1 Diagrama de bloques

La siguiente figura ilustra el concepto de diseño electrónico que se considera para el uso e implementación con la mesa indexada. En él se toma en cuenta las señales externas que proceden del robot, así como las señales de salida que ejecutará el sistema.

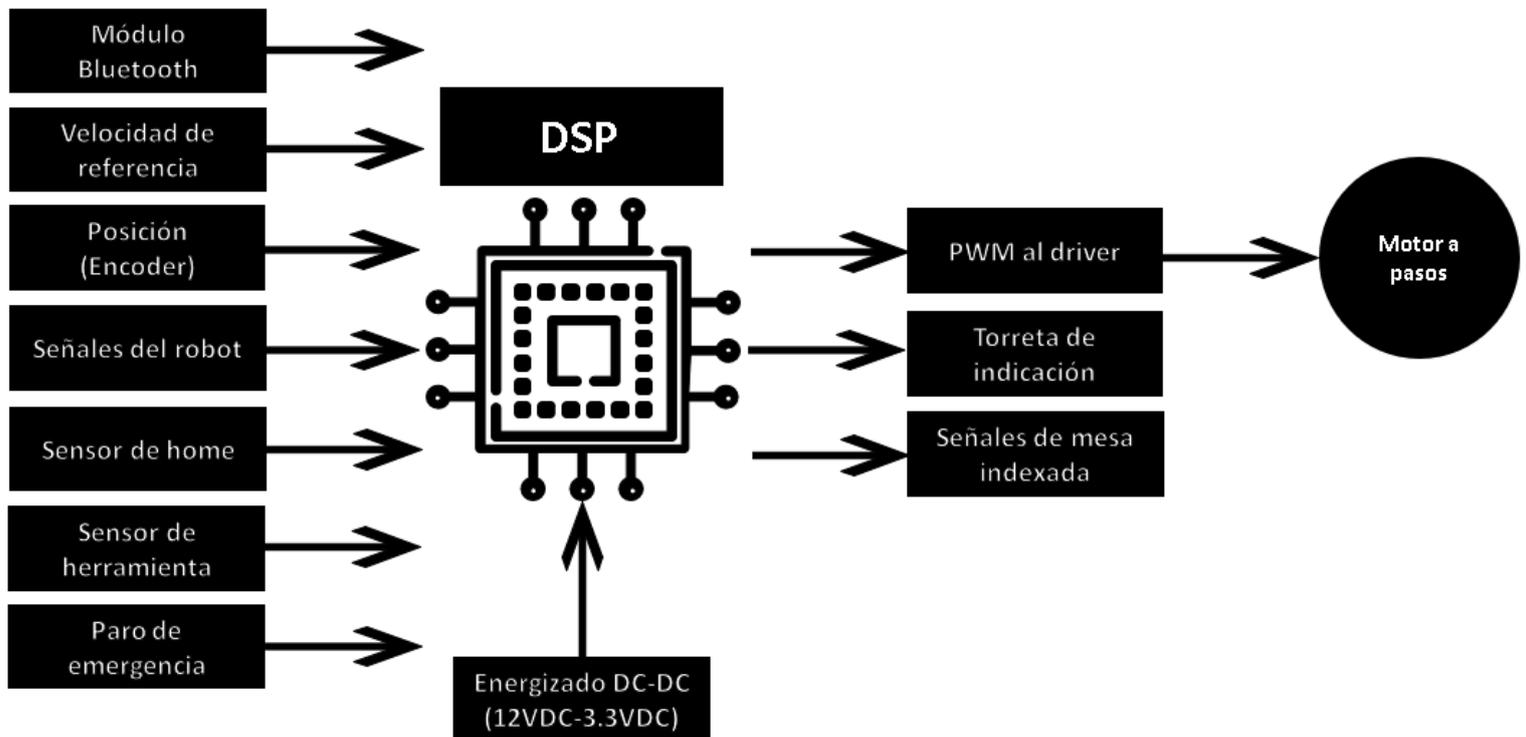


Fig. 5.1 Diagrama de bloques del sistema electrónico

Las señales aquí presentadas fueron la base para considerar el concepto inicial y su evolución y reconfiguración de lo que posteriormente se implementaría como concepto funcional inicial. Es también relevante destacar que se hicieron pruebas con un prototipo, el cual era gobernado por un microcontrolador, aunque finalmente, y luego de una deliberación interna, el DSP se eligió como parte de la arquitectura central de la mesa indexada para dejar al sistema con posibilidad de escalabilidad. Más adelante se expondrán las razones principales que respaldan esta decisión, puesto

que el microcontrolador es, sin duda, un dispositivo poderoso que forma parte de estas aplicaciones con regularidad.

Una mejor perspectiva del hardware involucrado se observa en la figura 5.2. A pesar de tratarse del mismo concepto anterior, esta imagen ofrece una mejor idea visual de lo que estará siendo parte del sistema que controlará a la mesa indexada al especificar cada módulo que fue implementado.

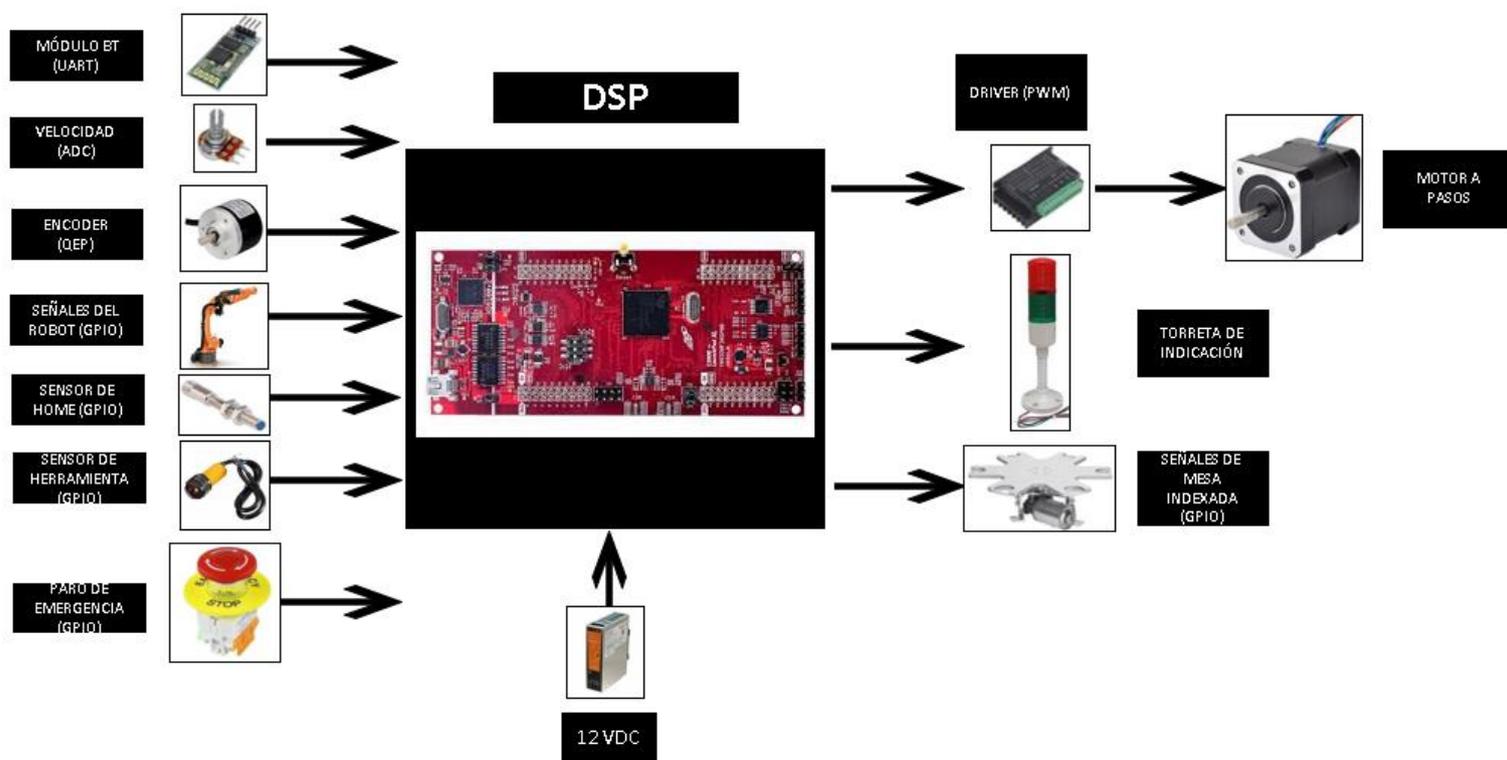


Fig. 5.2 Diagrama de bloques gráfico del sistema electrónico

En secciones posteriores se exponen de una manera más profunda y concisa, el diseño electrónico para este proyecto.

5.2 Diseño electrónico de la mesa indexada

Durante los primeros semestres del posgrado se trabajó con algunas tarjetas de desarrollo, de las cuales se destacan dos: una de ellas basada en MCU y la otra en DSP, ambas de la marca *Texas Instruments*, ofreciendo muy buenos resultados derivado de las prestaciones que estas ofrecen, verificados estos sobre un prototipo de mesa indexada que se desarrolló durante su fase de conceptualización se tomó la decisión de utilizar DSP. Dicho prototipo sirvió para representar la idea de proyecto de tesis al resaltar sus ventajas y beneficios potenciales que podría aportar a una celda de manufactura. Comparando el funcionamiento y potencialidades, los mejores resultados obtenidos se lograron a través del *DSP*⁽¹⁷⁾, que, entre otras cosas, y dada su naturaleza de trabajar con velocidades mayores de procesamiento, ofrece mejores respuestas en el sistema mecánico, desempeño fundamental que es necesario para la interacción posible con otros sistemas complejos, como por ejemplo, un robot. Con esta evidencia, el diseño electrónico final se proyectó con este dispositivo, haciendo uso de algunos de sus módulos de hardware, los cuales serán abordados en los siguientes capítulos, ofreciendo detalles técnicos y explicaciones basadas en su desempeño.

5.3 Antecedentes de diseño

La siguiente figura ilustra la arquitectura que se utilizó para el prototipo inicial de mesa indexada basada en DSP, y de la cual se explicará, de manera breve, el uso de los módulos ahí mostrados. En primer lugar, se enlista al módulo *GPIO*, el cual se configuró para el manejo de señales digitales de entrada y salida. El módulo *ADC* se utilizó para establecer la velocidad de indexado; en módulo *DAC* funcionó para establecer la posición a la que debía moverse la mesa dependiendo de la referencia de la herramienta a emplear; el *TIMER* se usó para establecer la cadencia de las indexaciones y el *PWM* para el control de la velocidad del motor. Es así como cada uno de estos módulos requirió de una configuración previa dentro del ambiente de desarrollo del DSP, que es *Code Composer Studio*, para poder ser considerados en la programación. En el apartado de configuración del hardware se detallará más esta actividad.

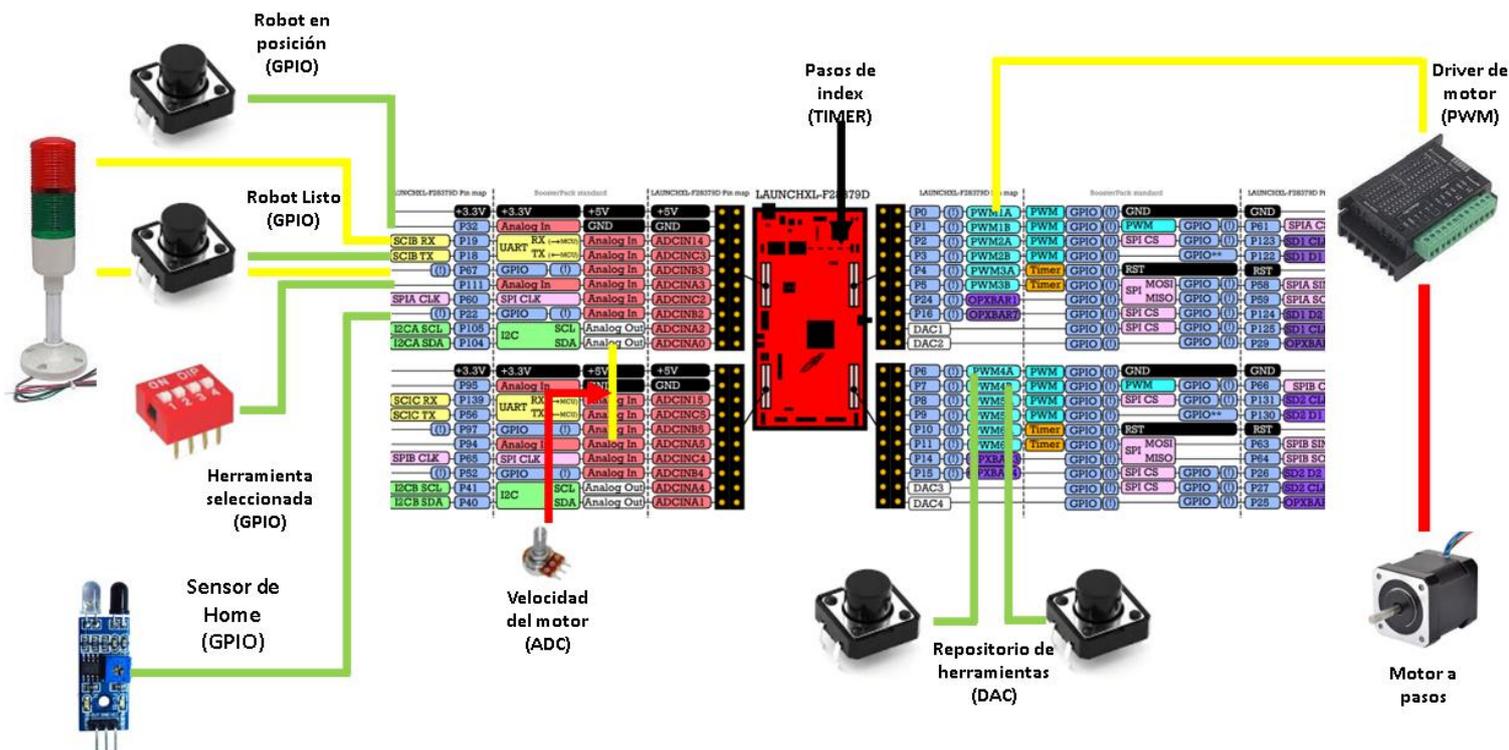


Fig. 5.3 Diagrama de bloques del sistema electrónico

En primera instancia se consideró un prototipo aislado sin interacción con algún otro sistema, obteniendo buenos resultados para considerar los requerimientos necesarios que se tomaron en cuenta para el diseño final del dispositivo que se muestran en el apartado siguiente.

5.4 Requerimientos electrónicos

La especificación técnica del hardware electrónico va de la mano con lo expuesto durante el capítulo IV, en donde se definen las características mecánicas que la mesa indexada debe cumplir. En este sentido, la parte eléctrica deberá apegarse en satisfacer los aspectos necesarios para el correcto funcionamiento. La siguiente tabla respalda de manera breve estos requerimientos.

Concepto	No. Serie	Marca	Especificaciones
Controlador de la mesa	TMS320F28379D	Texas Instruments	Ver apartado 5.5
Fuente de voltaje	PROECO 120W	Weidmuller	Voltaje de entrada: 120/240 VAC Voltaje de salida: 12 VDC Corriente: 10 A
Motor a pasos	57BYG250C	Oukeda	Voltaje de alimentación: 12-24 VDC Ángulo de paso: 1.8° Corriente: 3A / fase Par: 1.8°
Driver de motor a pasos	TB6600	REXQualis	Voltaje de entrada: 9/42 VDC Corriente: 0.5/4 A Control: Chopper PWM IC
Encoder	ENC400PV-5V	N/A	Voltaje de entrada: 5/30 VDC Corriente: 0.15 A Pul/Rev: 600 Fase de salida: AB Vel. Máx.: 6000 RPM
Torreta LED	EZ-LIGHT	AG-Electrónica	Voltaje de entrada: 12 VDC Corriente: 0.08 A Colores: verde y rojo
Sensor inductivo	LJ12A3-4-Z/BY	N/A	Voltaje de entrada: 5-36 VDC Corriente: 0.3 A Dist. De detección: 4 mm
Sensor óptico	E18-D80NK	Tinkbox	Voltaje de entrada: 5-36 VDC Corriente: 0.25 A Dist. De detección: 30 a 80 mm
Módulo Bluetooth	HC-05	Tecneu	Voltaje de entrada: 3.3-5 VDC Baudaje: 9600 default UART: 8 bits, 1 bit de paro y sin paridad Modos: Esclavo y maestro Corriente: 0.25 A
Módulo de relevadores 8 canales	SRD-05VDC-SL-C	Handsontec	Voltaje de bobina: 5 VDC Voltaje de operación: 30 VDC/250 VAC
Módulo de relevadores 4 canales	SRD-24VDC-SL-C	Handsontec	Voltaje de bobina: 24 VDC Voltaje de operación: 30 VDC/250 VAC
Convertidor CC/CC	LM2596	N/A	Voltaje De entrada: 4.5/40 VDC Corriente: 3 A
Potenciómetro	PDB181-K410K-102A2	Bourns	Voltaje De entrada: 3.3/30 VDC Mono vuelta
LED indicador	LED12VDC	Xider Electric	Voltaje: 12 VDC Color: Blanco
LED indicador	LED24VDC	Xider Electric	Voltaje: 24 VDC Color: Azul
Paro de emergencia	PE-NO-NC	Tecneu	Voltaje: 3.3-380 VDC Contacto: NO-NC
Clemas	2F24T	LIF	Voltaje: 3.3-380 VDC Puntos: 12
Electroválvula	4V210-08	Airtac	Voltaje: 24 VDC Tipo: Monoestable, 5/2

Tabla 5.1. Especificaciones eléctricas de la mesa index

Actualmente estos dispositivos ya están integrados en la mesa indexada, garantizando así que lo calculado anteriormente estará respaldado de manera integral, siguiendo los lineamientos establecidos y definidos en la especificación global. Con esta tarea completada, lo siguiente será definir las señales en tipo y cantidad, así como su origen y destino, con el fin de terminar de concebir el sistema electrónico que gobernará el movimiento de la mesa indexada. Para esta labor, es necesario antes desarrollar un diagrama de flujo, para así poder identificar todos los aspectos necesarios y que de otra manera serían difíciles de ver o percibir. En este diagrama deben tomarse en cuenta cosas como el arranque de la celda, inicialización y referencia de dispositivos, herramientas disponibles y su posición, etc., lo que ayudará a visualizar de manera más integral el funcionamiento de la celda.

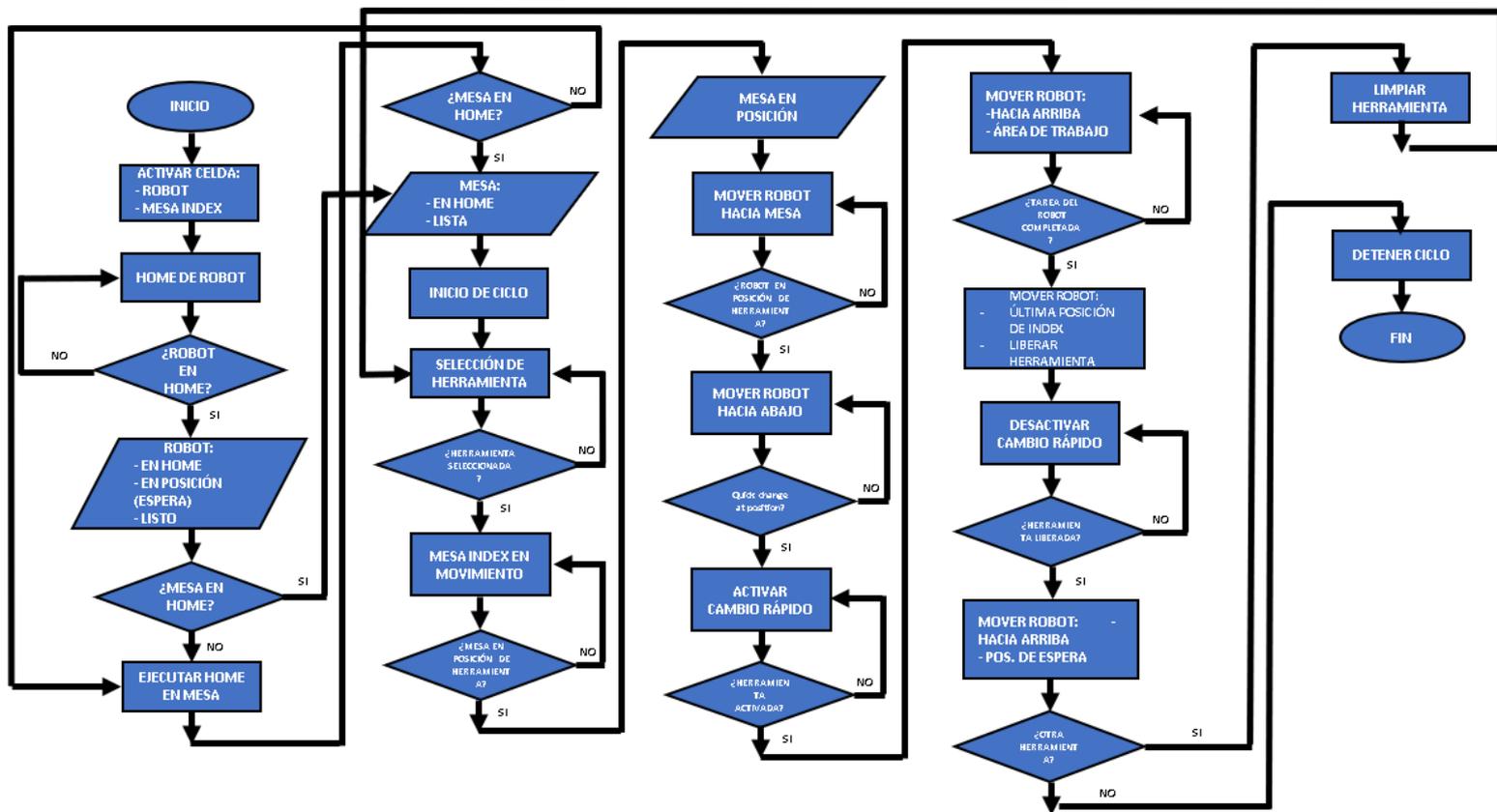


Fig. 5.4 Diagrama de flujo del sistema electrónico

El diagrama se explica a continuación.

- INICIO: Inicialización o arranque del ciclo de celda de manufactura.
- ENCENDER CELDA: Encendido de los dispositivos que conforman la celda: Robot, transportador sinfín, mesa index, sistema de visión, etc.
- HOME DE ROBOT: Por medio del software del robot, referenciarlo y encontrar su posición de inicio.

-
- ¿ROBOT EN HOME?: El robot, al estar en la posición inicial, genera y comparte una señal que indica que está en dicha posición.
 - ¿MESA EN HOME?: El controlador del robot recibe la señal de HOME o NO HOME de la mesa indexada; si no está en HOME, envía las señales adecuadas para hacerlo.
 - HOME DE MESA: Después de recibir la señal de posición de referencia del robot, la mesa indexada se mueve lentamente hasta encontrar su posición inicial por medio del sensor inductivo. En este punto, el encoder o posición se ponen en 0.
 - ¿MESA EN HOME?: Si la mesa ya está en HOME, esta envía una señal que lo confirma al robot.
 - INICIO DE CICLO: Con los sistemas correctamente referenciados, ya es posible comenzar el ciclo automático de la celda. El robot activa o pone en RUN a la mesa una vez iniciada su rutina.
 - SELECCIÓN DE HERRAMIENTA: En este punto se selecciona la herramienta que iniciará con el ciclo de la celda. El robot tiene hasta seis opciones de herramienta distintas.
 - ¿HERRAMIENTA SELECCIONADA?: Si ya se eligió una herramienta, entonces el robot envía las señales adecuadas para el controlador de la mesa.
 - MESA EN MOVIMIENTO: La mesa ha recibido la solicitud de herramienta del robot, y se comienza a desplazar a la posición de la herramienta. El encoder establece dicha referencia y el controlador del robot pone una bandera de BUSY para avisar al robot que se está moviendo.
 - ¿MESA EN POSICIÓN DE HERRAMIENTA?: El robot pregunta si la mesa ya está en posición. Si no es así, esta se sigue desplazando.
 - MESA EN POSICIÓN: El controlador del robot pone una bandera de INDEX IN POSITION para avisar al robot que ya está lista para que este recoja la herramienta.
 - MOVER ROBOT HACIA MESA: Si la mesa ya está en posición, entonces el robot comienza su rutina de movimiento y se desplaza hasta la ubicación de la posición de la herramienta.
 - ¿ROBOT EN POSICIÓN DE HERRAMIENTA?: Si el robot ya está en la ubicación de la herramienta, este retroalimenta a su rutina para la acción siguiente.
 - MOVER ROBOT HACIA ABAJO: El robot ejecuta un movimiento vertical hacia abajo, en donde acopla, de manera precisa, el cambio rápido con el portaherramienta.
 - ¿CAMBIO RÁPIDO EN POSICIÓN?: El robot, una vez en posición, emite una señal en donde confirma que ha llegado a la posición indicada para ensamblarse con el portaherramienta.
 - ACTIVAR CAMBIO RÁPIDO: El robot activa una salida digital, y esta a su vez activa una electroválvula que comanda a un cilindro neumático montado en el cambio rápido.
 - ¿HERRAMIENTA ASEGURADA?: Al activarse el cilindro, el controlador del robot entiende que ya se activó el mecanismo.

-
- **MOVER ROBOT HACIA ARRIBA:** Una vez recibida la señal del actuador, el robot entonces se mueve en línea recta verticalmente hacia la zona de trabajo, llevándose consigo la herramienta de trabajo.
 - **¿TAREA DE ROBOT FINALIZADA?:** Una vez terminada la tarea con la herramienta, el robot emite una señal de finalización del trabajo.
 - **MOVER ROBOT A ÚLTIMA POSICIÓN DE INDEXADO:** El robot entonces lleva nuevamente la herramienta a la última zona de donde la tomó.
 - **DESACTIVAR CAMBIO RÁPIDO:** Al desplazarse verticalmente hacia abajo, el robot deposita el portaherramienta en la posición de donde la tomó y la salida digital se desactiva, retrayendo al cilindro neumático y por consiguiente, al mecanismo.
 - **¿HERRAMIENTA LIBERADA?:** Al posicionarse sobre la última posición en la mesa indexada, el robot entonces libera a la brida, dejándola nuevamente sobre el plato.
 - **MOVER ROBOT A POSICIÓN DE ESPERA:** El robot, después de dejar la herramienta y asegurarse que ya se desacopló de ella, se desplaza hacia arriba de la mesa indexada, en la posición inicial y se mantiene en espera hasta que se le indique lo contrario.
 - **¿ALGUNA HERRAMIENTA MÁS?:** Si el algoritmo de la celda requiere el uso de otra herramienta, entonces se procede a repetir el ciclo de *TOOL SELECTION*, pero antes se debe limpiar el registro de herramienta previo para dar paso al nuevo. Esto se logra al activar *CLEAR TOOL*. Si ya no es necesario, el ciclo de celda termina. Esta serie de procesos permite ya, de una manera más objetiva, señalar e indicar las señales involucradas que serán tomadas en cuenta para el desarrollo del sistema electrónico. Cabe destacar que algunas de ellas deberán ser previa o posteriormente acondicionadas para poder trabajar, tanto con el DSP como con el controlador del robot.
 - **DETENER CICLO:** Si ya no hay más procesos de manufactura, el robot termina su rutina y pone en STOP a la mesa indexada.
 - **FIN:** Finalización del ciclo de celda de manufactura.

SEÑAL	TIPO DE SEÑAL	CANTIDAD	FORMATO BCD
Homing mesa index	Entrada Digital	1	N/A
Herramienta presente	Entrada Digital	1	N/A
Posición de plato EQEP1	Entrada Digital	2	N/A
RX Puerto serial SCIC	Entrada Digital	1	N/A
HC-05 ACTIVE	Entrada Digital	1	N/A
E STOP mesa index	Entrada Digital	1	N/A
ROBOT INDEX INIT	Entrada Digital	4	0000
TOOL SELECTED 1	Entrada Digital	-	0001
TOOL SELECTED 2	Entrada Digital	-	0010
TOOL SELECTED 3	Entrada Digital	-	0011
TOOL SELECTED 4	Entrada Digital	-	0100
TOOL SELECTED 5	Entrada Digital	-	0101
TOOL SELECTED 6	Entrada Digital	-	0110
CLEAR TOOL	Entrada Digital	-	0111
ROBOT COMMAND START	Entrada Digital	-	1000
ROBOT COMMAND STOP	Entrada Digital	-	1001
ROBOT COMMAND HOME	Entrada Digital	-	1010
ROBOT INDEX RESET	Entrada Digital	-	1011
ROBOT IN POSITION	Entrada Digital	-	1100
ROBOT DONE	Entrada Digital	-	1101
ROBOT BUSY	Entrada Digital	-	1110
ROBOT FAIL	Entrada Digital	-	1111
VELOCIDAD MESA INDEX	Entrada Analógica	1	N/A
MESA INDEX NO HOME	Salida Digital	4	0001
HOMED MESA INDEX	Salida Digital	-	0010
START STATUS MESA INDEX	Salida Digital	-	0011
STOP STATUS MESA INDEX	Salida Digital	-	0100
HOME STATUS MESA INDEX	Salida Digital	-	0101
BUSY MESA INDEX	Salida Digital	-	0110
IN POS MESA INDEX	Salida Digital	-	0111
FAIL MESA INDEX	Salida Digital	-	1000
BT ACTIVE	Salida Digital	-	1001
LED HOME	Salida Digital	1	N/A
LED START	Salida Digital	1	N/A
LED STOP	Salida Digital	1	N/A
MOTOR COMMAND START	Salida Digital	1	N/A
TX Puerto serial SCIC	Salida Digital	1	N/A
TOTAL		21	

Tabla 5.2. Señales involucradas en la mesa indexada

El microcontrolador TMS320F28379D es un diseño de procesador dual en donde cada procesador es idéntico con acceso a su propias FLASH Y RAM locales. La comunicación entre ambos CPU' s se logra con el módulo IPC (*Inter-Processor Communications*). Adicionalmente, cada procesador comparte acceso a un set común de periféricos analógicos y de control altamente integrados, entregando una solución completa para aplicaciones en tiempo real de alto desempeño, tales como potencia digital, drives industriales, inversores y *control de motores*. La siguiente tabla resume las características básicas y esenciales del dispositivo.

ITEM	Descripción
CPU	2 C28x
Frecuencia (MHz)	200
Memoria flash(kB)	1024
Memoria RAM (kB)	204
Resolución del ADC	12 y 16 bit
MIPS	800
UART (SCI)	4
EQEP	2
CAN	2
Filtro Sigma-Delta	8
Canales de PWM	24
Seguridad funcional	Cumple con Seguridad funcional

Tabla 5.3 Características del procesador ⁽¹⁷⁾

Como herramientas de apoyo, Texas Instruments provee piezas o sets de software que incluyen librerías, ejemplos y configuraciones para acelerar el uso de la tarjeta, tales como:

- Descarga libre de Code Composer Studio™ IDE
- Descarga gratuita de C2000Ware para drivers de dispositivo y proyectos ejemplo
 - Plataforma de soporte DesignDRIVE
 - Software de soporte powerSUITE software support
- MathWorks Embedded target support
- solidThinking Embed support

Así mismo, se encuentran disponibles piezas de hardware compatibles con la tarjeta, incluso listas para conectarse y usarse, tales como:

- BOOSTXL-DRV8301
- BOOSTXL-DRV8305EVM
- BOOSTXL-BUCKCONV
- BOOSTXL-3PHGANINV

Realmente la oferta de Texas Instruments es muy amplia, y es por esta razón que el microcontrolador elegido para este proyecto fue el TMS320F28379D, pues con sus características, la escalabilidad se potencia y el dispositivo podrá evolucionar de manera que su interacción en ambientes industriales sea una realidad.

5.5.1 Módulos del procesador

El procesador posee una variedad de módulos interesantes, como lo es la unidad de punto flotante, unidad trigonométrica, unidad Viterbi, compleja y CRC, CLA, DMA y periféricos, cómo ADC, QEP, PWM, SPI, SCI, I2C, CAN, CAP y GPIO.

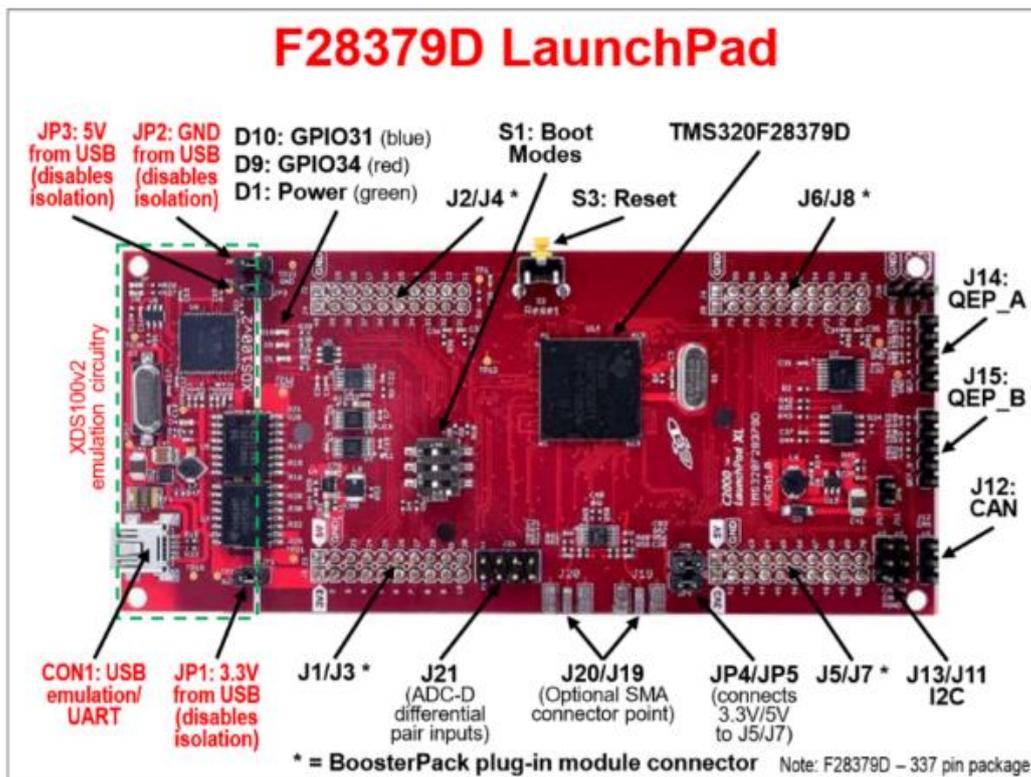


Fig. 5.6 Vista general del F28379D ⁽¹⁸⁾

5.6 Selección de módulos del controlador (DSP)

El apartado 5.4 arrojó las señales y sus características necesarias para la mesa indexada. No obstante, no todas son señales digitales. Algunas son o forman parte de módulos más complejos, los cuales son parte de la arquitectura del DSP, descrita anteriormente, y que será necesario configurar para utilizarlas. La siguiente tabla explica, de manera breve, en qué consisten estos módulos y su función en el sistema electrónico.

Nombre	Definición	Función
QEP	<i>Quadrature Encoder Pulse</i>	Registrar los pulsos provenientes de un encoder rotatorio incremental para obtener la posición y velocidad del motor
UART (SCI)	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>	Protocolo para el intercambio de datos en serie entre dos dispositivos. En este caso, la comunicación asíncrona entre un módulo bluetooth y el DSP.
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	Controla la velocidad del motor de acuerdo con la velocidad de referencia
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>	Referencia de velocidad mediante potenciómetro
GPIO	<i>General Purpose Input-Output</i>	Manejo de señales digitales de propósito general

Tabla 5.4 Módulos del DSP

El apartado siguiente explica cómo se configuraron estos módulos en el DSP, de manera resumida pero suficientemente entendible para el lector.

5.7 Configuración del hardware

La programación del controlador amerita que, previo a desarrollar la lógica, se integren al proyecto las librerías correspondientes a los módulos o periféricos que se pretenden emplear. Ya en el apartado anterior se platicó un poco acerca de dichos módulos y sus funciones, pero en este se abordará su configuración.

La configuración de los módulos se presenta a continuación.

ADC:

```
void ADC_init(){
    EALLOW; // Función que inicializa al ADCA
    long y;
    CpuSysRegs.PCLKCR13.bit.ADC_A = 1; // Alimenta reloj a ADCA
    AdcaRegs.ADCCTL2.bit.PRESCALE = 0; // El ADC toma el reloj global
    AdcaRegs.ADCCTL1.bit.ADCPWDNZ = 1; // Habilita ADC A
    for(y = 0; y<5000; y++); // Delay antes de convertir
    AdcaRegs.ADCSOC5CTL.bit.ACQPS = 49; // Ventana de muestreo de 50 ciclos de SYSCLK
    AdcaRegs.ADCSOC5CTL.bit.CHSEL = 5; // SOC5 Convertirá ADCIN5
    EALLOW;
    AdcaRegs.ADCINTSEL1N2.bit.INT1SEL = 5; // EOC como fuente de conversión
    AdcaRegs.ADCINTSEL1N2.bit.INT1E = 1; // Habilita interrupción INT1
    AdcaRegs.ADCINTSEL1N2.bit.INT1CONT = 1; // Modo continuo habilitado
    AdcaRegs.ADCINTSOCSEL1.bit.SOC5 = 1; // ADCINT1 redisparará; SOC5
    AdcaRegs.ADCSOCPRCTL.bit.SOC5PRIORITY = 6; // SOC 5 como prioridad
    EDIS;
    AdcaRegs.ADCSOCFRC1.all = 0x0020; // Pon las banderas SOC desde SOC0 hasta SOC5
}
}
```

Fig. 5.7 Configuración del ADC

Para el ADC se configuró en canal 5 con el modo continuo habilitado. Sin embargo, esta función estará habilitada vía software únicamente cuando el equipo esté en estado *STOP*. A dicho canal se encuentra conectado un potenciómetro de 10kΩ, el cual establece el nivel de velocidad deseado. Para más detalles, la configuración del ADC se encuentra en el manual del DSP en la página 1387⁽²⁰⁾.

PWM:

```
void ePWM1_init(){
    EALLOW; // Función que inicializa al ePWM1
    CpuSysRegs.PCLKCR2.bit.EPWM1 = 1; // Alimenta reloj a PWM1
    CpuSysRegs.PCLKCR0.bit.TBCLKSYNC = 1; // Habilita inicio de conteo PWM
    EDIS;
    EPwm1Regs.TBCTL.all = 0x00;
    EPwm1Regs.TBPRD = 50000; // Conteo hacia arriba UP
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.ZRO = 2; // 120MHz / (2*50000) = 1.2kHz
    EPwm1Regs.AQCTLA.bit.CAU = 1; // Cuando TBCTR = 0 pone la salida en alto
    // CMPA pone la salida en bajo
}
}
```

Fig. 5.8 Configuración del PWM

El PWM se configuró en modo contador ascendente, con una frecuencia de 1.2 kHz, y utilizando el GPIO 0 como PWM1. Este módulo toma el valor proveniente del ADC y lo multiplica por un factor en el registro comparador del PWM, logrando restablecer la velocidad final del dispositivo. Esta señal ingresa al puerto de entradas del drive del motor junto con la señal de dirección que en este caso es en sentido antihorario.

Para más detalles, la configuración del PWM se encuentra en el manual del DSP, en la página 1674 ⁽¹⁹⁾.

EQEP:

```
void eQEP1_Init(){
    EALLOW; // Función que inicializa al eQEP1
    EQep1Regs.QDECCTL.bit.QSRC=1;
    EQep1Regs.QDECCTL.bit.XCR=1; // Modo contador QEP
    EQep1Regs.QEPCTL.bit.FREE_SOFT=2; // Resolución x1
    EQep1Regs.QPOSMAX=599;
    EQep1Regs.QEPCTL.bit.PCRM=1; // Pulsos por revolución
    EQep1Regs.QEPCTL.bit.QPEN=1; // Modo PCRM=01 - QPOSCNT se restablece
    EDIS; // cuando llega a MAXPOS
} // Habilita eQEP
```

Fig. 5.9 Configuración del EQEP

El TMS320F28379D posee 3 módulos eQEP integrados. Para este caso se utilizó en módulo EQEP1, y el cual está integrado por cinco pines, tres de ellos para las señales A, B y Z y dos más para la alimentación y la referencia. El encoder de cuadratura de este proyecto únicamente posee las señales A y B, las cuales están desfasados 90° eléctricos y entregan posición y dirección. La resolución es de 600 pulsos por revolución.

Para más detalles, la configuración del eQEP1 se encuentra en el manual del DSP, en la página 2068⁽¹⁹⁾.

SCI:

```
void SCIC_init(){
    ScicRegs.SCICCR.all = 0x0007; // Función que inicializa al SCIC
    ScicRegs.SCICTL1.all = 0x0003; // 1 bit de paro, sin paridad, 8 char bits
    ScicRegs.SCICTL2.bit.TXINTENA = 0; // Habilita TX, RX, SCICLK interno
    ScicRegs.SCICTL2.bit.RXBKINTENA = 0; // Interrupción en TX deshabilitada
    ScicRegs.SCIEXST.bit.RXRDY = 1; // Interrupción en RX deshabilitada
    ScicRegs.SCICTL2.bit.TXRDY = 1; // Listo para leer bufer de entrada
    // Listo para escribir bufer de salida

    // 9600 BAUDS LSPCLK = 50 MHZ
    // @LSPCLK = 25 MHZ (120 MHZ SYSCLK) HBAUD = 0x01
    // and LBAUD = 0x44

    ScicRegs.SCIHBAUD.all = 0x01; // Valor en el registro alto de SCIBAUD
    ScicRegs.SCILBAUD.all = 0x44; // Valor en el registro bajo de SCIBAUD
    ScicRegs.SCIFFCT.all = 0x0;

    ScicRegs.SCICTL1.all = 0x0023; // Renicia el puerto serial
    ScicRegs.SCIFFTX.bit.TXFIFORESET = 1; // Limpia el búfer de TX
    ScicRegs.SCIFFRX.bit.RXFIFORESET = 1; // Limpia el búfer de RX
}
}
```

Fig. 5.10 Configuración del SCI

El módulo SCI (o UART) se configuró para establecer comunicación serial vía bluetooth desde un gadget al controlador. Sus 9600 baudios y 1 bit de paro, sin paridad y 8 bits de tamaño por defecto, fueron suficientes para satisfacer las necesidades de comunicación externa.

Para más detalles, la configuración del SCIC se encuentra en el manual del DSP, en la página 2164⁽¹⁹⁾.

GPIO:

```
void GPIO_init(){
    EALLOW;
    // GPIO'S PARA EQEP1
    GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO20 = 1;
    GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO21 = 1;
    GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO22 = 1;
    GpioCtrlRegs.GPAPUD.bit.GPIO23 = 1;
    // Las GPIO's tienen que ser sincronizadas con
    // el reloj del sistema:
    GpioCtrlRegs.GPAQSEL2.bit.GPIO20 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAQSEL2.bit.GPIO21 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAQSEL2.bit.GPIO22 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAQSEL2.bit.GPIO23 = 0;
    // Cada GPIO que va a ser usada para ser configurada
    // como una entrada EQEP: E
    GpioCtrlRegs.GPAGMUX2.bit.GPIO20 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAGMUX2.bit.GPIO21 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAGMUX2.bit.GPIO22 = 0;
    GpioCtrlRegs.GPAGMUX2.bit.GPIO23 = 0;

    GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO20 = 1;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO21 = 1;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO22 = 1;
    GpioCtrlRegs.GPAMUX2.bit.GPIO23 = 1;

    // Desctiva resistencias de pullup (EQEP1A) QEP_A
    // Desctiva resistencias de pullup (EQEP1B) QEP_A
    // Desctiva resistencias de pullup (EQEP1S) QEP_A
    // Desctiva resistencias de pullup (EQEP1I) QEP_A

    // Sincroniza GPIO20 a SYSCLK (EQEP1A)
    // Sincroniza GPIO21 a SYSCLK (EQEP1B)
    // Sincroniza GPIO22 a SYSCLK (EQEP1S)
    // Sincroniza GPIO23 a SYSCLK (EQEP1I)

    // Configura GPIO20 como EQEP1A
    // Configura GPIO21 como EQEP1B
    // Configura GPIO22 como EQEP1S
    // Configura GPIO23 como EQEP1I

    // Configura GPIO20 como EQEP1A
    // Configura GPIO21 como EQEP1B
    // Configura GPIO22 como EQEP1S
    // Configura GPIO23 como EQEP1I
}
```

Fig. 5.11 Configuración del GPIO

Finalmente, el módulo GPIO englobó la mayor parte de pines para configurar y conectar señales de entrada y salida digitales, así como sensores y estatus de proceso.

En el apartado 5.9 se describirá el software o programación involucrada en el funcionamiento de la mesa indexada. No obstante, es importante resaltar la importancia de las configuraciones anteriores, pues son necesarias para el adecuado funcionamiento de acuerdo con las especificaciones del proyecto.

Para más detalles, la configuración del SCIC se encuentra en el manual del DSP, en la página 905⁽¹⁹⁾.

5.8 Implementación del hardware en mesa indexada

La figura 5.12 esquematiza la configuración a la que se llegó como resultado del diseño y estudio de las necesidades del proyecto, y la cual se explica a continuación. El módulo BT es la interfaz con el usuario, pues a través de este medio se podrá configurar el sistema desde un dispositivo móvil, ya sea un smartphone, tablet, etc. El módulo eQEP se configuró para registrar los pulsos provenientes de un encoder incremental, proporcionando un mayor nivel de confiabilidad en el movimiento, dado que este es altamente necesario al estar trabajando con un robot industrial. Esta arquitectura ya no trabaja en vacío, sino ya dentro de la celda de manufactura, ejecutando pruebas y mejoras hasta determinar el arreglo óptimo; además, se diseñó de una interfaz óptima que permite la parametrización y despliegue de información relevante del sistema y para ello se integró un módulo

BT, el cual, vía UART tiene comunicación con el sistema. Así mismo, la interfaz tiene cabida en plataformas móviles, como smartphones y tabletas, incrementando su funcionalidad y versatilidad.

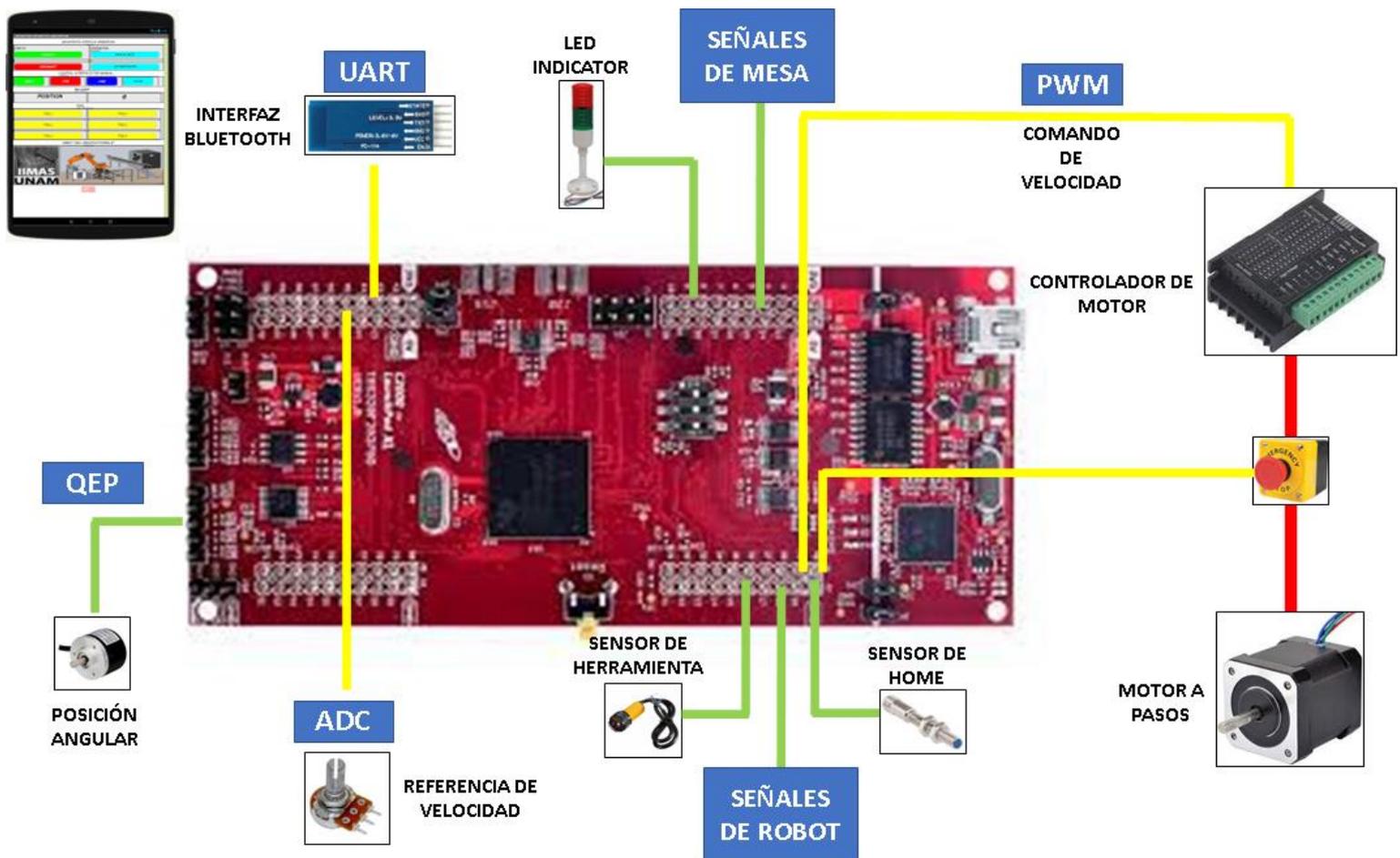


Fig. 5.12 Esquematización del sistema electrónico de la mesa indexada

5.9 Descripción del software de la mesa indexada

Como se describió en los capítulos 5.7 y 5.8, previo al diseño del software del proyecto, es estrictamente necesaria la configuración de los módulos o periféricos a emplear, para que, posteriormente, se pueda establecer la cohesión lógica necesaria para llevar a cabo las tareas involucradas en el dispositivo. Así mismo, y debido a la falta o ausencia de entradas y salidas digitales disponibles en el robot, se optó por trabajar con señales codificadas en BCD, es decir, se emplean cuatro bits de entrada y cuatro bits de salida, con lo que se tienen hasta 32 estados posibles que permiten la comunicación bidireccional de los componentes de la celda.

Una descripción breve del flujo de programa se presenta a continuación. No obstante, al final de este documento, en la sección de anexos se expondrá parte del código a disposición del lector, a fin de consolidar lo explicado a continuación.

- Declaración de librerías: Apartado en donde se especifican las directivas necesarias que integran los archivos de configuración del hardware
- Declaración de variables: Apartado en donde se declaran todas las variables globales que se emplean en el programa.
- Declaración de funciones principales: Apartado en donde se declaran las funciones que van a ser llamadas al programa principal.
- Programa principal y ciclo infinito: Apartado en donde se concentra toda la lógica relacionada a la operación del dispositivo.
- Lectura de puerto serial y módulo de encoder: Apartado en donde se realizan de manera constante, las lecturas de los módulos SCI y QEP.
- Asignación de variables de entrada y salida: Apartado que enlaza las variables con las entradas y salidas físicas del dispositivo.
- Codificación de las entradas en formato BCD: Apartado en donde se conjuntan los estados que conformarán las entradas al DSP, con un total de cuatro entradas digitales.
- Gestión del modo manual y automático: Apartado en donde el sistema genera banderas que determinan quien tiene el mando del dispositivo: si el robot o el gadget conectado vía BT.
- Configuración de los estados START, STOP, HOME, FAIL y RESET: Apartado en donde se enlazan las señales provenientes del robot y las provenientes del gadget.
- Subrutinas principales: START, STOP y HOME: Lógica útil que permite operar al dispositivo conforme los estados requeridos.
- Codificación de las salidas en formato BCD: Apartado en donde ese conjuntan los estados que conformarán las salidas del DSP, con un total de cuatro salidas digitales.
- Desarrollo y configuración de las funciones principales: Apartado en donde se desarrolla la configuración precisa y ordenada de cada uno de los módulos de acuerdo con lo establecido en el manual de usuario.

```

// CONFIGURACIÓN DEL ESTADO INDEX START
if ((start == true) && (stop == false) && (Home_position == true) && (tool_present == false)){
    status_start = true;           // Pon en 1 estatus de START
    status_stop = false;          // Pon en 0 estatus de STOP
    status_home = false;         // Pon en 0 estatus de HOME
}
// CONFIGURACIÓN DEL ESTADO INDEX STOP
else if ((stop == true) || (e_stop_pressed == true)){
    status_start = false;        // Pon en 0 estatus de START
    status_stop = true;         // Pon en 1 estatus de STOP
    status_home = false;        // Pon en 0 estatus de HOME
}
// CONFIGURACIÓN DEL ESTADO INDEX HOME
else if ((home == true) && (stop == false) && (start == false)){
    status_start = false;       // Pon en 0 estatus de START
    status_stop = false;        // Pon en 0 estatus de STOP
    status_home = true;         // Pon en 1 estatus de HOME
}
// CONFIGURACIÓN DEL ESTADO INDEX FAIL
if (e_stop == true){
    Home_position = false;
    e_stop_pressed = true;
    Index_fail = true;
    status_start = false;        // Pon en 0 estatus de START
    status_stop = false;        // Pon en 1 estatus de STOP
    status_home = false;        // Pon en 0 estatus de HOME
}
// RESET DEL ESTADO INDEX FAIL
else if(((e_stop == false) && (reset_fail == true)) || (buffer_rx == 11)){
    e_stop_pressed = false;
}

```

Fig. 5.13 Configuración de los estados del proyecto

5.10 Adecuación de señales y niveles de voltaje de operación

El controlador del robot KUKA KR C4 funciona con un nivel de voltaje de control de 24 VDC, obligando con ello a que cualquier sistema externo que desee acoplarse deba cumplir con este requisito. Sin embargo, el controlador de la mesa indexada trabaja con un voltaje de 3.3 VDC, imposibilitando de momento, la interacción de ambos sistemas. Para resolver este asunto, dentro de la configuración de la mesa indexada se trabajó con módulos relevadores, con los cuales fue posible dicha interacción. Se usaron dos módulos, uno con un voltaje de entrada (voltaje de control para bobinas) de 24 VDC y voltaje de relevación de 3.3 VDC para interacción con el DSP; para las salidas del DSP, se usó un módulo con voltaje de salida (voltaje de control para bobinas) de 3.3 VDC y voltaje de relevación de 24 VDC para interacción con el controlador del robot. Internamente, el gabinete de control maneja una fuente de voltaje de 12 VDC, y se emplearon módulos convertidores de CC a 3.3 VDC y 5VDC. Para mayor información, en el anexo de este documento se presentan los planos eléctricos para un mejor entendimiento del lector.

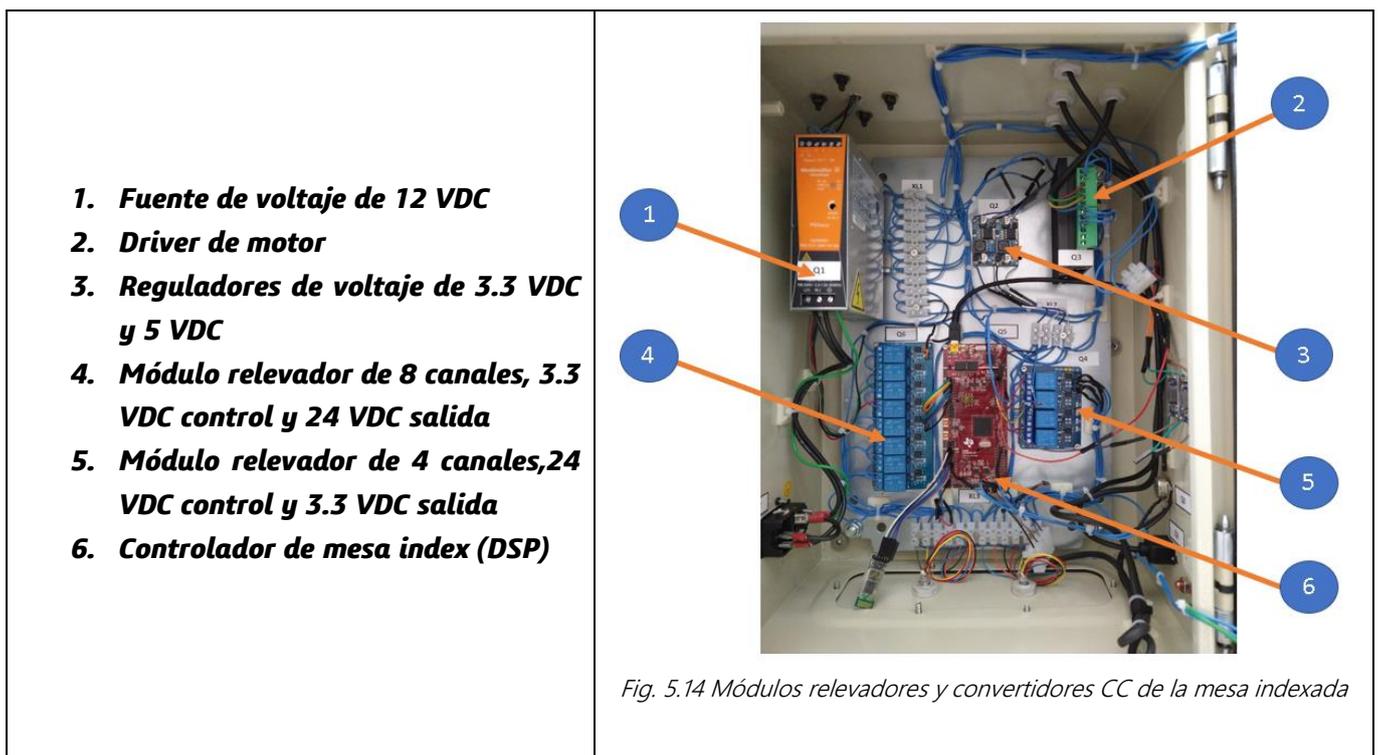


Tabla 5.5 Descripción de módulos de adecuación de voltaje

5.11 Diseño de GUI para la parametrización de la mesa indexada

El diseño de dispositivos electrónicos actuales demanda que se cuente, en la medida de lo posible, de una interfaz o medio para visualizar información, datos, comportamientos y proyecciones que estos desempeñen. No es por demás mencionar el uso masivo de dispositivos móviles, tales como smartphones, tablets o computadores que, gracias al desarrollo de software especializado, es factible crear interfaces gráficas altamente amigables e intuitivas, al grado de que cualquier persona, sin ser especialista, las diseñe. No obstante, no se trata de algo trivial, y requiere, dependiendo la aplicación, dedicación y tiempo para realizar una buena ejecución. Es así como se determinó incluir el desarrollo de una interfaz gráfica para poder parametrizar y visualizar datos provenientes de la mesa indexada, que puedan ser útiles para la toma de decisiones y planeación dentro de la celda de manufactura antes de integrarla de manera automática al ciclo de trabajo. Esta interfaz es capaz de establecer comunicación directa con el controlador de la mesa indexada, vía inalámbrica, de manera confiable y segura, sin la necesidad de contar con una pantalla o interfaz física, aprovechando los recursos tecnológicos actualmente disponibles.

La interfaz se desarrolló en una plataforma libre llamada *APP INVENTOR*⁽²⁰⁾, la cual fue creada por *Google Labs* para aplicaciones destinadas, principalmente, para dispositivos Android. El usuario puede, de forma visual y a partir de un conjunto de herramientas básicas, ir enlazando una serie de bloques para crear la aplicación. Lo destacable de esta herramienta es la simplicidad con que se puede diseñar la programación de la GUI. La imagen de la figura 61 visualiza de mejor manera dicha programación.

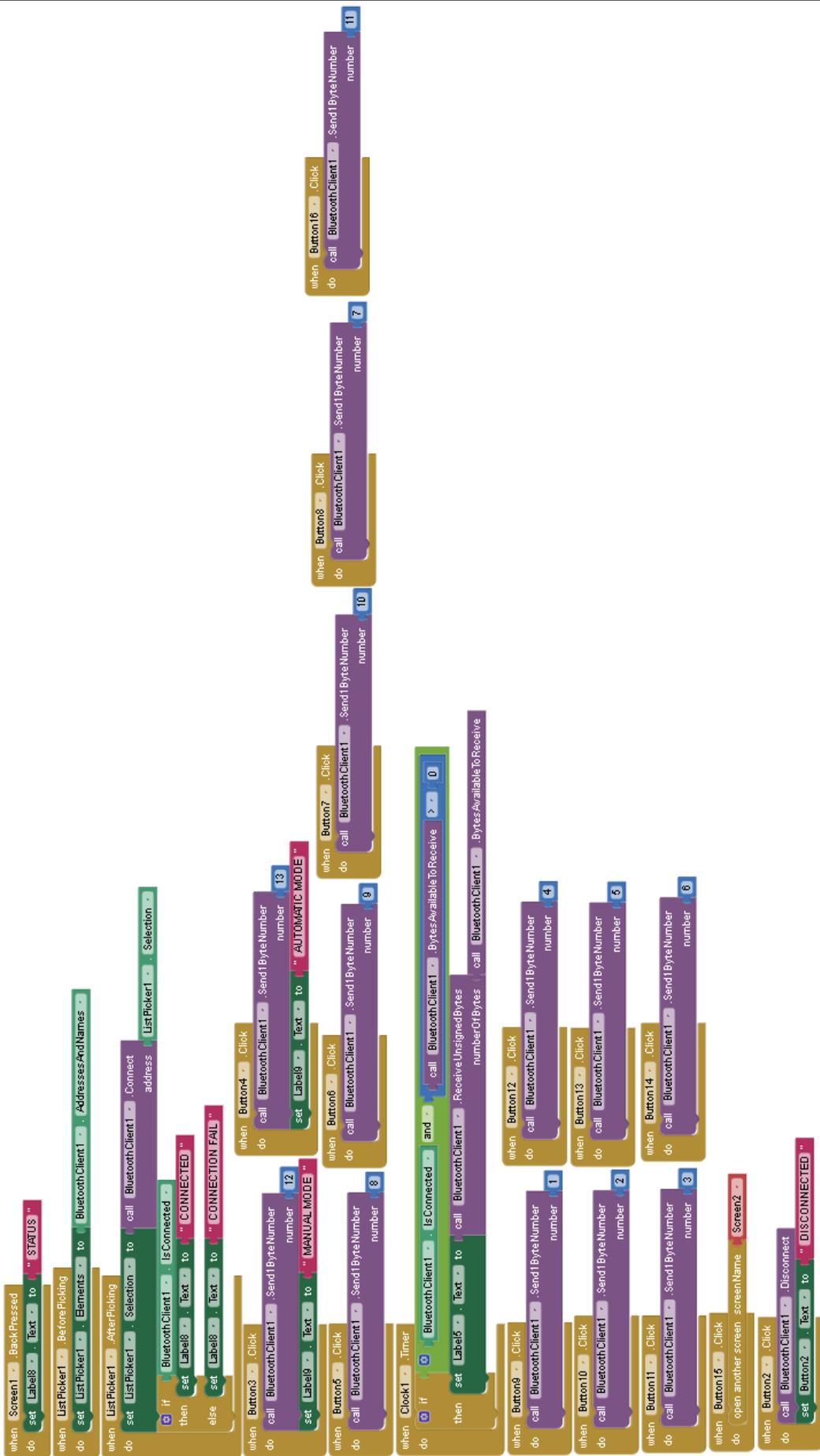


Fig. 5.15 Programación de la GUI

De manera gráfica se programa empleando estructuras de control, tales como *do*, *while*, *if-then-else*, etc. Es así como se llegó al siguiente diseño de GUI o interfaz de usuario gráfica final para este proyecto de tesis.

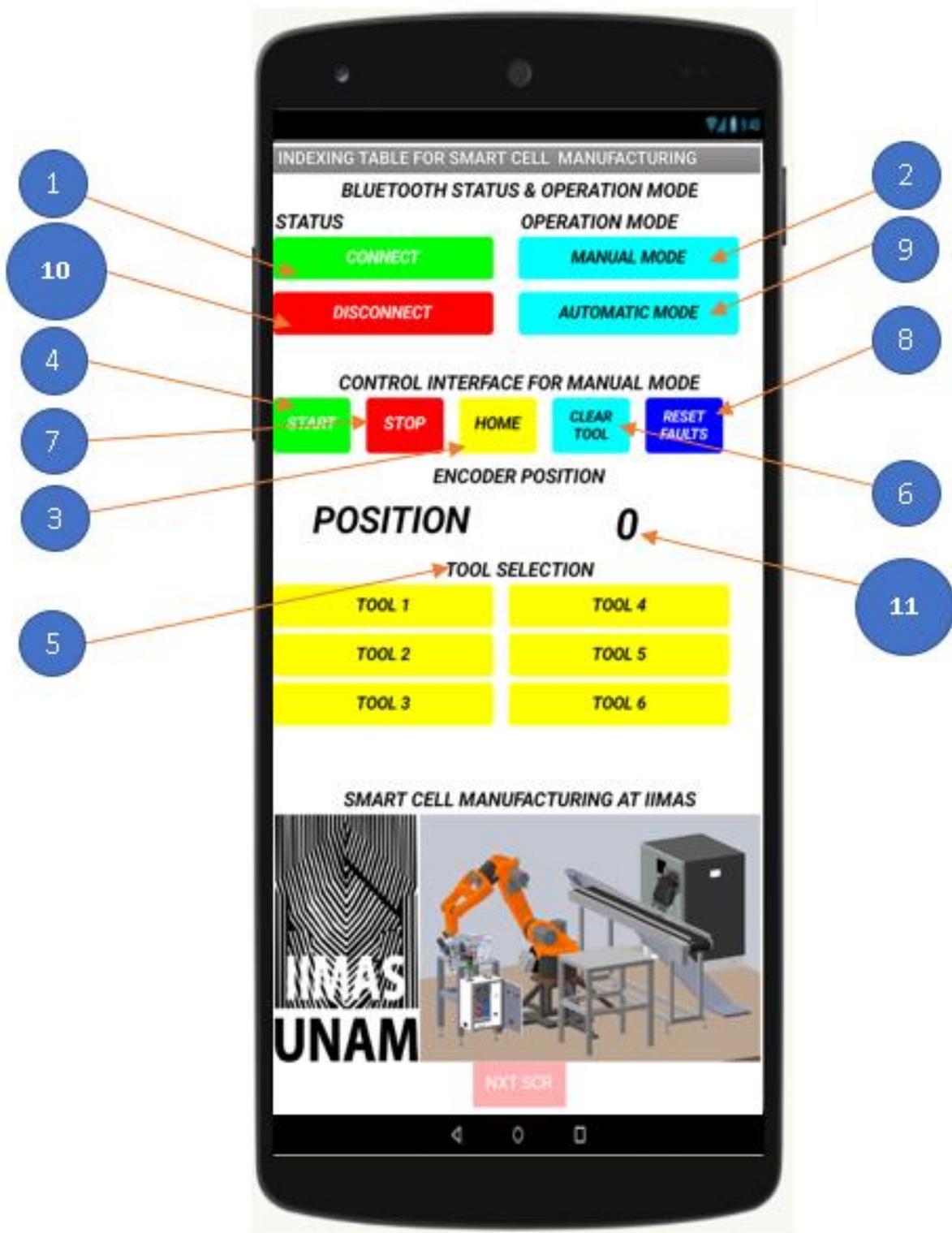


Fig. 5.16 Interfaz de control vía BT para la mesa indexada

La funcionalidad de esta *app* se describe a continuación. En la parte superior se cuenta con los mandos de *conectividad* (1) *Bluetooth*, los cuales interactúan directamente con el controlador inalámbrico BT del gadget para establecer comunicación con el HC-05. Una vez establecida la comunicación, el usuario será capaz de determinar si el mando lo posee el gadget, o bien, el dispositivo externo al que se añadirá la mesa indexada, el cual, en este caso, resulta ser el robot. Si se desea tener el *MODO MANUAL* (2), entonces la mesa obedecerá las instrucciones enviadas desde el gadget. Estas instrucciones son las de *START*, *STOP*, *HOME*, *CLEAR TOOL* y *RESET FAULTS*. El sistema entonces debe ser referenciado a *HOME* (3). Cuando este en *HOME*, es posible hacer pruebas de indexado. Esto se logra al presionar *START* (4) y después, se elige la *herramienta* (5) o posición a la que se desee llegar (TOOL 1, ... TOOL 6). El sistema entonces se desplazará hacia esa posición dependiendo de la posición inicial o de origen establecida. Si se desea tener acceso a otra herramienta, el sistema o control superior deberá limpiar la solicitud de herramienta, que en este caso, se logra con el botón *CLEAR TOOL* (6) o sencillamente, detenerla al presionar *STOP* (7). Finalmente, el botón de *RESET FAULTS* (8) limpia las fallas internas una vez atendidas para continuar con la rutina preestablecida. Cabe destacar que el sistema, por defecto, estará siempre en *MODO AUTOMÁTICO* (9), pues su intención es la de ser parte de una celda autónoma. Es así que, al *desconecta* (10) la comunicación Bluetooth, el equipo vuelve a *MODO AUTOMÁTICO* nuevamente. Finalmente, la *POSICIÓN* (11) no es sino la visualización del estatus de la mesa en tiempo de ejecución, únicamente para fines de monitoreo. El siguiente diagrama de flujo explica la secuencia que hay que seguir para utilizar la *app*, el cual es muy sencillo y detallado.

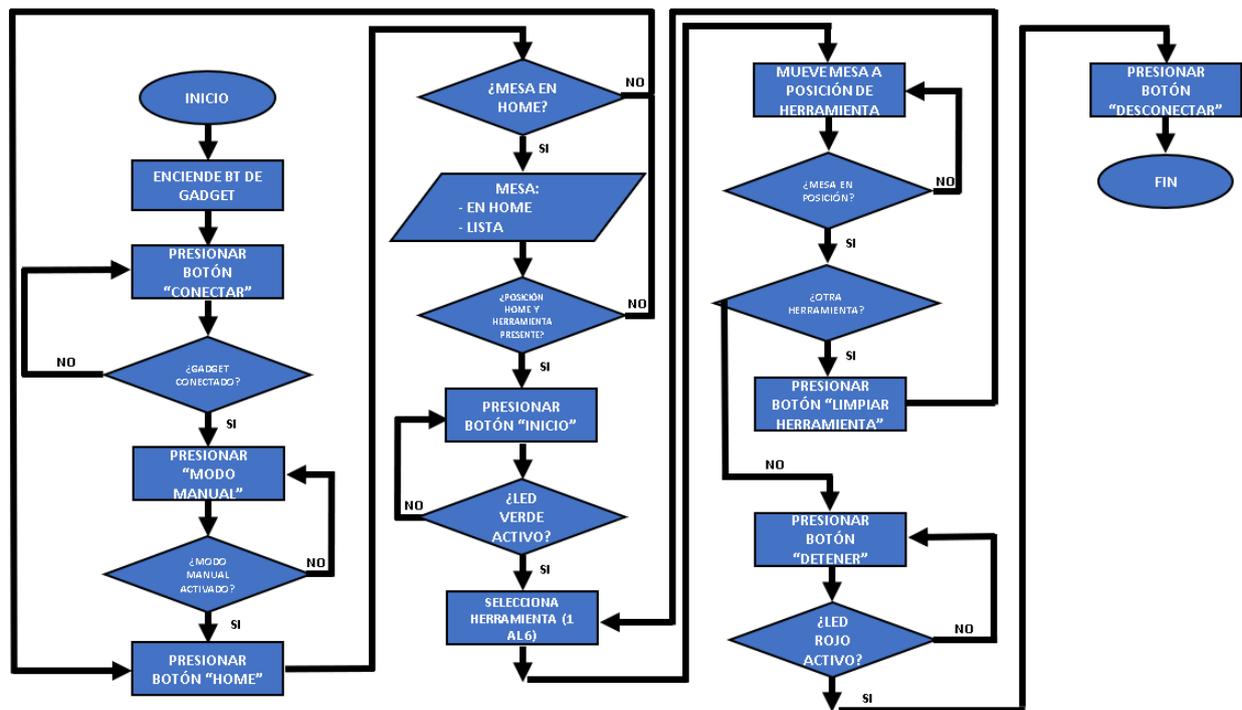


Fig. 5.17 Diagrama de flujo del uso de la *app*

El diagrama se explica a continuación.

- INICIO: Inicialización o arranque del ciclo de celda de manufactura.
- ENCENDER BT DE GADGET: Se enciende el BT desde el menú principal del gadget.
- PRESIONAR BOTÓN "CONECTAR": Al presionar el botón, la aplicación busca los dispositivos BT disponibles. El usuario deberá elegir el correspondiente asociado con el dispositivo.
- ¿GADGET CONECTADO?: Si el gadget se conectó correctamente con el dispositivo, aparecerá una leyenda de "CONNECTED" en la *app*.
- PRESIONAR "MODO MANUAL O AUTOMATICO": Para manipular el dispositivo desde el gadget, es necesario activar el MODO MANUAL. Si se desea transferir el control al robot, por ejemplo, se presiona MODO AUTOMÁTICO. Este modo es en el que se encuentra el dispositivo por defecto, y si se llegara a perder la comunicación BT, automáticamente pasará a este modo de operación.
- ¿MODO MANUAL ACTIVADO?: Si se seleccionó el modo manual, es posible manipular el dispositivo.
- PRESIONAR BOTÓN "HOME": Para manipular el dispositivo, primero hay que referenciarlo. Esto se logra al presionar el botón de HOME. La mesa se moverá hasta llegar a su posición inicial.
- ¿MESA EN HOME Y HAY HERRAMIENTA?: Si la mesa está en HOME, entonces es posible comenzar un ciclo de prueba, y si además hay herramienta en la posición inicial, entonces la mesa indexada comenzará su ciclo.
- PRESIONAR BOTÓN "START": Botón de arranque o inicio del ciclo. La torreta presenta el estatus de arranque al ponerse el LED verde activo.
- SELECCIONAR HERRAMIENTA: Después de presionar este botón, se selecciona la herramienta a la que se desea llegar: desde la 1 hasta la 6.
- ¿MESA EN POSICIÓN? Al seleccionar la herramienta, la mesa se moverá hasta llegar a la posición de la herramienta. Si llegó, envía una señal de que se encuentra en posición.
- ¿ALGUNA OTRA HERRAMIENTA?: Si el usuario requiere otra herramienta, primero debe presionar el botón de CLEAR TOOL y seleccionarla. Todo esto mientras se está en el estado RUN.
- PRESIONAR BOTÓN "STOP": Si ya no se requieren más pruebas, se presiona STOP para detener el equipo.
- PRESIONAR BOTÓN "DESCONECTAR": Para desconectar el gadget del dispositivo, basta con presionar el botón con la leyenda "DISCONNECT" en la *app*.
- FIN: Finalización del ciclo manual de mesa indexada.

CAPÍTULO VI: IMPLEMENTACIÓN DE MESA INDEXADA A CELDA

La integración del sistema electrónico con el sistema mecánico dentro del concepto global de mesa indexada se detalló en el capítulo anterior. Toca entonces en este detallar la integración a la celda, en específico el cómo es que se llevará a cabo la interconexión entre sistemas. Es importante destacar que el laboratorio cumple con los estándares básicos necesarios para el uso responsable del robot, dado que se trata de un dispositivo industrial y por consiguiente, conlleva ciertos riesgos a la hora de operarlo. En ese sentido, el diseño de la mesa indexada se apegó estrictamente a estos lineamientos, garantizando así que, en el momento del funcionamiento en conjunto, no existe o haya riesgo latente para nadie dentro del laboratorio.

La imagen siguiente ejemplifica la interconexión entre estos sistemas, resaltando que la comunicación entre ellos será mediante señales digitales que, por supuesto, deberán ser acondicionadas para trabajar correctamente.

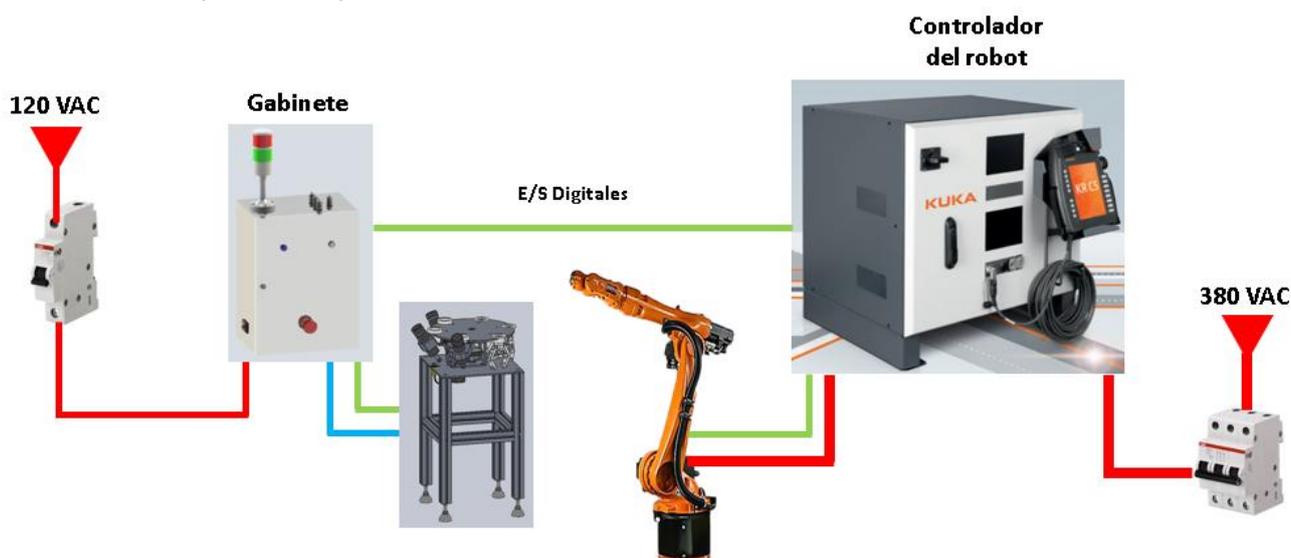


Fig. 6.1 Interconexiones de mesa index y robot

La mesa indexada trabaja a 12 VDC, mientras que el robot a 380 VAC; el laboratorio cuenta con un compresor estándar que ofrece hasta 6 bares de presión, suficiente para poder accionar el cilindro neumático que forma parte del cambio rápido. Se cuenta con protecciones eléctricas y ambos sistemas cuentan con módulo de visualización de alarmas, para un mejor diagnóstico en caso de imprevistos.

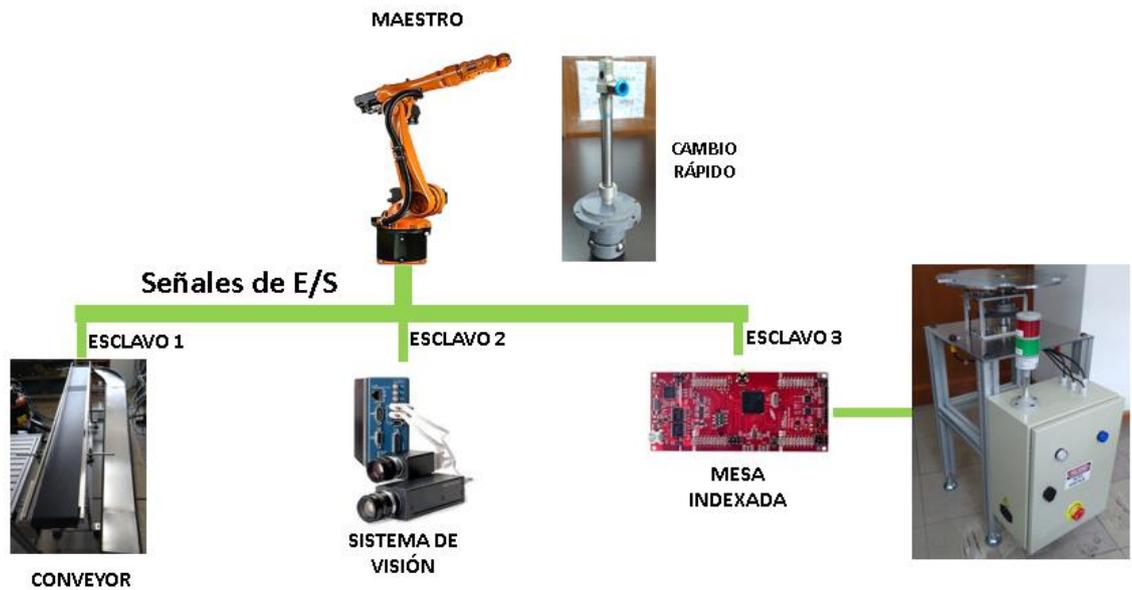


Fig. 6.2 Arquitectura de celda de manufactura

En un modo muy general, se presenta la arquitectura de la celda de manufactura, en donde entran al juego no solo la mesa indexada y el robot, sino otros sistemas tales como un transportador sinfín y sistema de visión, complementando así la funcionalidad de esta. El robot funge como el dispositivo maestro, mientras que el resto de los dispositivos, como esclavos, los cuales estarán disponibles para las tareas que el robot vaya a desempeñar.

Uno de los siguientes apartados aborda, de manera más profunda, el esquema de solicitud de herramientas y como este involucra a los dispositivos que conforman a la celda de manufactura.

6.1 Descripción de la celda de manufactura: componentes

El concepto de celda de manufactura involucra por definición, dispositivos y componentes orientados a facilitar o a ejecutar operaciones de manufactura, siendo el robot el más importante, pues es él quien realiza directamente las actividades relacionadas con la manufactura. No obstante, con el apoyo del resto de los dispositivos es como se logra la correcta ejecución de operaciones de manera precisa y óptima. Ahora bien, a continuación se explicará brevemente en qué consiste cada dispositivo, y como y en qué medida se involucra en el funcionamiento de la celda.

6.1.1 Conveyor

El conveyor o transportador sinfín se trata de un mecanismo actuado por motor eléctrico y control de velocidad. Su función principal es la de trasladar objetos a lo largo de su longitud, con el objetivo de ofrecer al robot la posibilidad de elegir qué piezas tomar para las operaciones que este vaya a realizar.

Sus características mecánicas son:

- **Largo: 1.5 m**
- **Ancho: 0.25 m**
- **Alto: 1.20 m**

Sus características eléctricas son:

- **Voltaje de entrada: 120 VAC @ 60 Hz**
- **Fases: 1**



Fig. 6.3 Conveyor

Tabla 6.1 Características del conveyor de la celda

6.1.2 Sistema de visión

El sistema de visión consta de una cámara montada en el último eslabón del robot, con el objetivo de dotarlo de visión artificial para tareas de manufactura. Con este sistema es como el robot elige las piezas que están sobre el transportador sinfín. El sistema reconoce formas y patrones gracias a su programación. Este es un proyecto de doctorado de un compañero de laboratorio.

Sus características mecánicas son:

- **Largo: 0.1 m**
- **Ancho: 0.1 m**
- **Alto: 0.1 m**

Sus características eléctricas son:

- **Voltaje de entrada: 12 VDC**

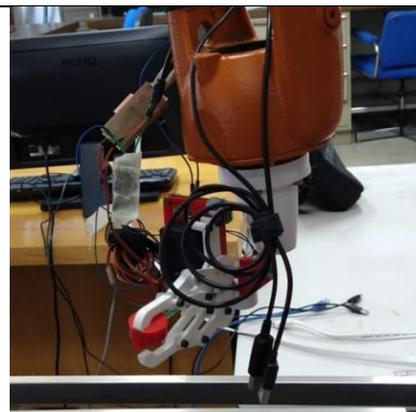


Fig. 6.4 Sistema de visión

Tabla 6.2 Características del sistema de visión de la celda

6.1.2 Mesa indexada

Se trata del componente principal de esta tesis de posgrado. La mesa indexada es el dispositivo que suministra herramientas al robot. Dicho sistema tiene capacidad para proveer hasta seis herramientas, todas colocadas sobre el plato indexado. La comunicación con el robot es a través de señales digitales, las cuales fluyen tanto del controlador de la mesa indexada como del robot, y bajo un algoritmo de ejecución, el robot solicita la herramienta adecuada para su tarea de manufactura. Gracias al modelo de estados, ambos sistemas conocen siempre el estatus del otro dispositivo, facilitando y optimizando los movimientos y tareas a ejecutar.

Sus características mecánicas son:

- **Largo: 0.4 m**
- **Ancho: 0.4 m**
- **Alto: 1.20 m**

Sus características eléctricas son:

- **Voltaje de entrada: 120 VAC @ 60 Hz**
- **Voltaje de operación: 12 VDC**
- **Fases: 1**



Fig. 6.5 Mesa indexada

Tabla 6.3 Características de la mesa indexada de la celda

6.1.3 Mesa de trabajo

La mesa de trabajo es un componente muy básico en construcción y conceptualización, pero muy importante dentro de la cadena de manufactura de la celda, pues es donde se llevan a cabo las operaciones ejecutadas por el robot. Este dispositivo está fabricado en aluminio, con una altura de 90 cm aprox. Y cuya superficie se encuentra mapeada por el brazo robótico.

Sus características mecánicas son:

- **Largo: 0.4 m**
- **Ancho: 0.4 m**
- **Alto: 1.20 m**



Fig. 6.6 Mesa de trabajo

Tabla 6.4 Características de la mesa de trabajo

6.1.4 Brazo robótico

El componente principal de la celda de manufactura es, por supuesto, el brazo articulado. Este robot, de seis ejes, está diseñado para aplicaciones medianas, ya que solo puede manipular cargas de no más de 5 kg, pero es óptimo para tareas de manufactura como pintura, soldadura, manipulación, etc. A continuación se detallará más sus características mecánicas y eléctricas.



Fig. 6.7 Robot KUKA

6.2 Descripción del robot KUKA KR5: Mecánica

El robot de la celda es uno de la familia *KUKA Roboter GmbH*⁽²²⁾, marca alemana posicionada entre una de las mejores del mundo en cuanto a fabricación de robots se refiere. Específicamente, este robot de 6 grados de libertad puede cargar en su último eslabón hasta 5 kg. Su masa total es de 127 kg, lo que lo hace ligero y muy rápido a la hora de ejecutar sus movimientos. Posee una repetibilidad de +/- 0.004 mm.

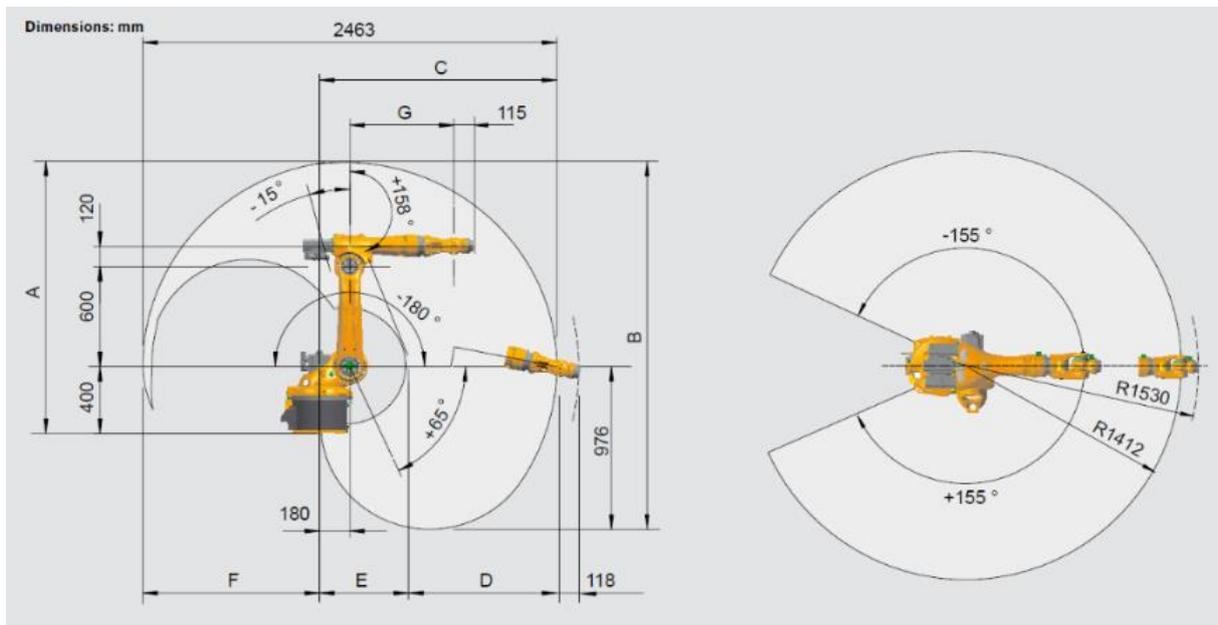


Fig. 6.8 Dimensiones generales del robot⁽²²⁾

La imagen siguiente muestra las especificaciones mecánicas más importantes a considerar del robot.

Type	KR 5 arc
Maximum reach	1,411 mm
Rated payload	5 kg
Suppl. load, arm/link arm/rotating col.	12/-/20 kg
Suppl. load, arm + link arm, max.	-
Maximum total load	37 kg
Number of axes	6
Mounting position	Floor, ceiling
Variant	-
Positioning repeatability*	±0.04 mm
Path repeatability*	
Controller	KR C2 edition2005
Weight (excluding controller), approx.	127 kg
Temperature during operation	+10 °C to +55 °C
Protection classification	IP 54, IP 65 (In-line wrist)
Robot footprint	324 mm x 324 mm
Connection	7.3 kVA
Noise level	< 75 dB

Axis data	Range (software)	Speed with rated payload 5 kg
Axis 1 (A1)	±155°	154°/s
Axis 2 (A2)	+65°/-180°	154°/s
Axis 3 (A3)	+158°/-15°	228°/s
Axis 4 (A4)	±350°	343°/s
Axis 5 (A5)	±130°	384°/s
Axis 6 (A6)	±350°	721°/s

Fig. 6.9 Especificaciones técnicas del robot KUKA KR5⁽²²⁾

6.3 Descripción del robot KUKA KR5: Electrónica

El controlador del robot KUKA KR5, con denominación KUKA KR C4, posee las siguientes características eléctricas:

- KPP central AC power supply connection in interconnected operation
- Power output with 400 V supply voltage: 14 kW
- Rated current: 25 A DC
- Connection and disconnection of the supply voltage
- Powering of several axis amplifiers from the DC link
- Integrated brake chopper through connection of an external ballast resistor
- Overload monitoring by the ballast resistor
- Stopping of synchronous servomotors by means of short-circuit braking

Fig. 6.10 Características eléctricas del KUKA KR C4 ⁽²¹⁾

Cuenta con variedad de interfaces de comunicación, incluyendo *EtherCAT*, *Profibus*, *DeviceNET* y entradas y salidas digitales. La vista interna del dispositivo se muestra a continuación.

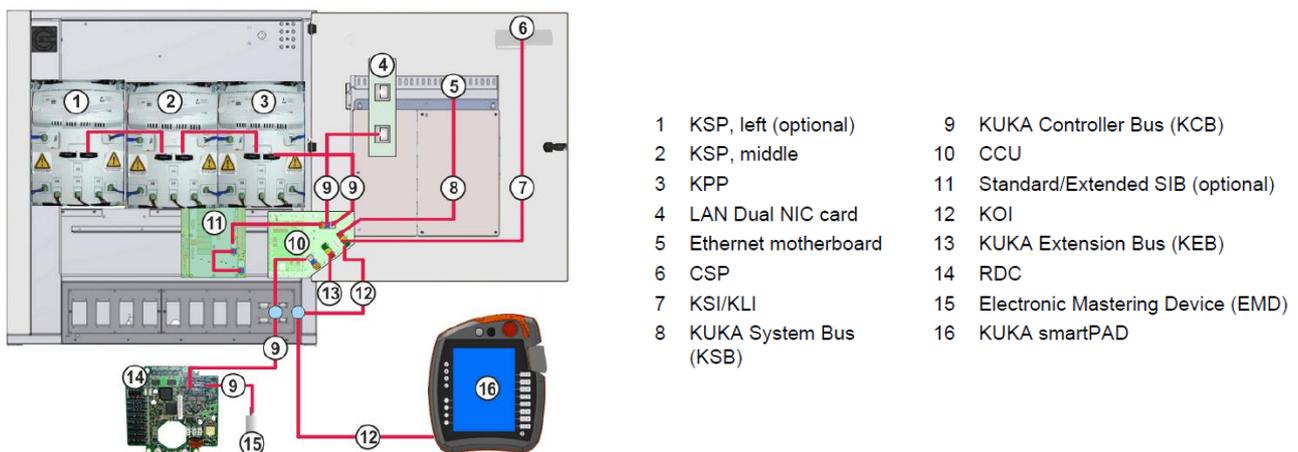


Fig. 6.11 Vista general del controlador KUKA KR C4 ⁽²¹⁾

El *SmartPAD* o *teach pendant* es el dispositivo mediante el cual es posible programar rutinas, configurar y establecer los parámetros necesarios que el robot necesita para operar.



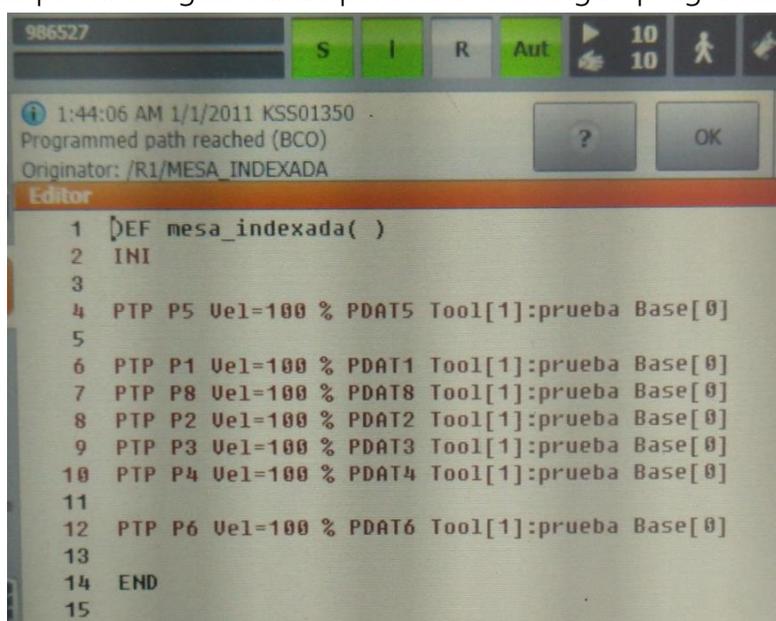
Fig. 6.12 SmartPAD ⁽²¹⁾

La comunicación con el controlador KUKA KRC4 se estableció a través de las entradas y salidas digitales. En total, se usarán 4 entradas y 5 salidas del robot, de las cuales, 4 entradas y cuatro salidas corresponden al sistema de codificación BCD para el manejo de estados de la mesa (tabla 5.2), y

una quinta salida para controlar la electroválvula neumática que accionará al cambio rápido montado en el robot.

6.4 Descripción de la programación del robot KUKA KR5

De acuerdo con el manual de programación del robot, *KUKA KSS 8.3 para SI⁽²¹⁾*, las instrucciones para comandar al robot pueden ser movimiento punto a punto (PTP), movimiento circular (CIRC), movimiento lineal (LIN), y movimiento estriado (SPLINE), principalmente. Su uso es relativamente sencillo y su estructura dentro del programa lo es más aún. Un programa típico consta de la función principal, el inicio, el desarrollo o cuerpo y la terminación, donde su ejecución culmina. La figura 6.13 ilustra el estilo de programación empleado. Este tipo de robots, como muchos actuales, permite una programación *TEACHING POINT* o de enseñanza al manipulador, donde por medio de la manipulación manual de sus ejes es posible generar trayectorias que de otra manera sería muy complejo diseñar, y las permite ir guardando para su uso en algún programa.



```
986527
S I R Aut 10 10
1:44:06 AM 1/1/2011 KSS01350
Programmed path reached (BCO)
Originator: /R1/MESA_INDEXADA
Editor
1 DEF mesa_indexada( )
2 INI
3
4 PTP P5 Ue1=100 % PDAT5 Tool[1]:prueba Base[0]
5
6 PTP P1 Ue1=100 % PDAT1 Tool[1]:prueba Base[0]
7 PTP P8 Ue1=100 % PDAT8 Tool[1]:prueba Base[0]
8 PTP P2 Ue1=100 % PDAT2 Tool[1]:prueba Base[0]
9 PTP P3 Ue1=100 % PDAT3 Tool[1]:prueba Base[0]
10 PTP P4 Ue1=100 % PDAT4 Tool[1]:prueba Base[0]
11
12 PTP P6 Ue1=100 % PDAT6 Tool[1]:prueba Base[0]
13
14 END
15
```

Fig. 6.13 Ejemplo de código de programa de robot

El robot y la mesa indexada están interconectados mediante cuatro puntos de entrada y cuatro de salida codificados en BCD, permitiendo trabajar con un mayor número de estados (hasta 16) con pocas señales. Entre esos estados se encuentran los de estatus, tanto del robot como de la mesa, y sus comandos de inicio y paro para generar una programación estructurada y ordenada.

Las señales provenientes de la mesa indexada salen de un módulo de relevadores e ingresan al controlador del robot a través de un zócalo de conexiones múltiples, pasa por clemas y llegan hasta el módulo de entradas digitales *EL1008*; por otro lado, las señales provenientes del robot salen del módulo de salidas de este (*EL2008*) e ingresan a las clemas del gabinete de control de la mesa, llegando hasta los módulos relevadores donde los niveles de voltaje se compatibilizan para poder

trabajar de manera adecuada. La figura 6.14 muestra el módulo de E/S integrado en el controlador del robot. Cabe destacar que dada la naturaleza de funcionamiento de los relevadores de entrada al DSP, es necesario comandar las salidas desde el robot de manera negada, a fin de poder ejecutar los estados involucrados con esas señales.

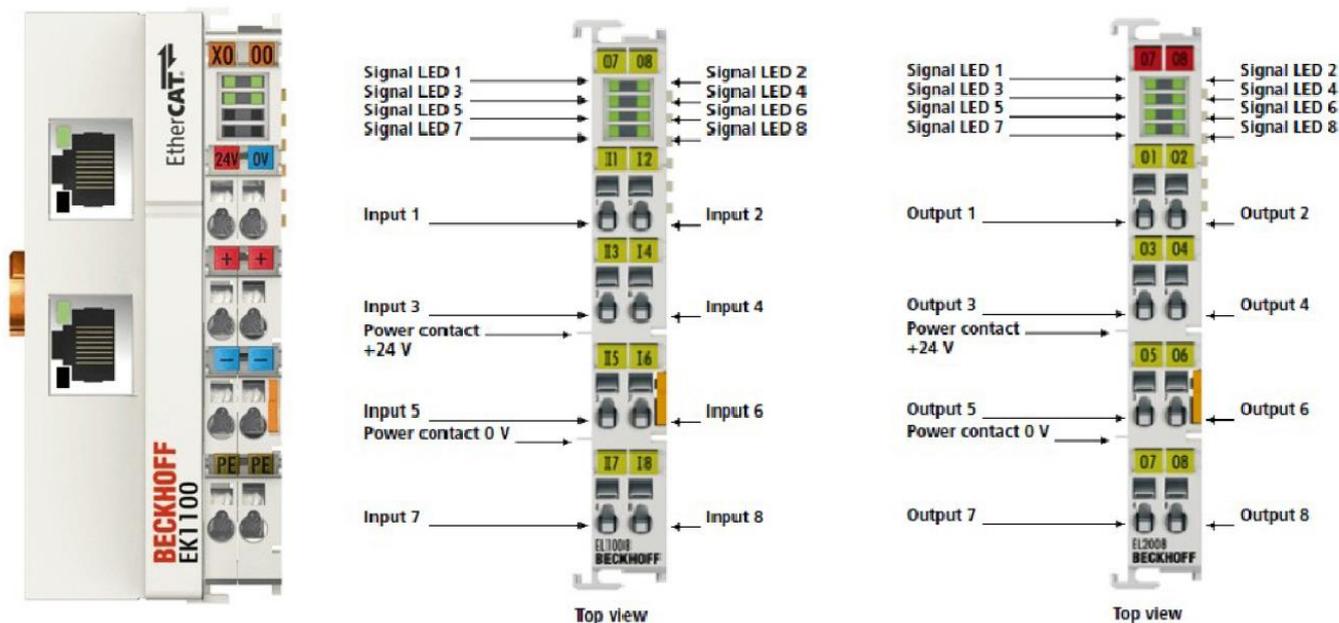


Fig. 6.14 Módulo de E/S del robot⁽²¹⁾

La descripción detallada del código se presenta como anexo al final de esta tesis. Sin embargo, un breve extracto de este se explica en la tabla siguiente.

INSTRUCCIÓN	DESCRIPCIÓN
DEF mesa_indexada250822 ()	Función principal
INT	Inicio del programa
; RESTABLECE MESA INDEXADA	El robot manda restablecer cualquier fallo que pudiera existir en la mesa indexada
; LIMPIA HERRAMIENTAS	El robot manda limpiar el registro de herramientas de la mesa indexada
; ACTIVA HOME MESA INDEXADA	El robot manda posicionar a la mesa indexada a su referencia o HOME antes de comenzar el ciclo automático
; SELECCIONA HERRAMIENTA 3	El robot manda la instrucción de seleccionar la herramienta número tres
; INICIA CICLO DE MESA INDEXADA	El robot comanda a la mesa indexada para que inicie su ciclo al poner en la posición de recolección la herramienta preseleccionada
; INICIA RUTINA ROBOT PRIMERA VEZ	Una vez que la mesa dejó en posición la herramienta preseleccionada, el robot inicia su ciclo al ir por la herramienta y recogerla mediante el cambio rápido

; ACTIVA VÁLVULA DE CAMBIO RÁPIDO	Cuando el robot se posiciona o ensambla sobre la herramienta, se activa la electroválvula, asegurándola mediante el mecanismo de <i>SWITCH-RELEASE</i>
; RUTINA DE ROBOT	El robot regresa a su zona de trabajo para ejecutar la tarea requerida
; DESACTIVA VÁLVULA DE CAMBIO RÁPIDO	Al terminar la tarea, el robot regresa a la mesa y deja la herramienta en la misma posición donde la tomó. Al realizar esta acción, la electroválvula se desactiva y el robot libera la herramienta. El robot asciende unos centímetros esperando la siguiente herramienta. El ciclo anterior se repite la cantidad de veces necesarias hasta terminarlo.
; DETÉN MESA INDEXADA	Al terminar el ciclo de celda, el robot regresa a su posición de <i>HOME</i> y manda detener o poner en estado de <i>STOP</i> a la mesa indexada.

Tabla 6.5 Descripción general del programa del robot

6.5 Esquema de solicitud de herramientas

El proceso de selección y cambio de herramienta se entiende mejor si se trata como un esquema de solicitud, en donde la tarea que el robot vaya a desempeñar dirige la selección y el orden de estas, con el fin de cumplirla al pie de la letra y de forma continua y automática, con la certeza de que se llevará a cabo en tiempo y forma. La siguiente tabla ejemplifica el esquema descrito.

PROCESO	HERRAMIENTA	CÓDIGO	POS. ACTUAL	POS. SIGUIENTE	ESTATUS	SIGUIENTE PROCESO
Manipulación	Gripper	GRIP-00	0	3	DONE	Roscado
Roscado	Roscador	ROSC-03	3	5	DONE	Atornillado
Atornillado	Atornillador	ATR-05	5	0	BUSY	Fin

Tabla 6.6 Esquema de solicitud de herramientas

Los procesos van seriados y gracias a los estados de la mesa indexada, es posible saber la condición actual y así poder planear los siguientes con mayor precisión.

Finalmente, en la sección del anexo "Especificación de diseño" de este documento se presenta un desglose de presupuesto vs costo real del proyecto como sustento a lo abordado en capítulos anteriores sobre los beneficios de este dispositivo mecatrónico.

CAPÍTULO VII: RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se abordará, de manera objetiva y concreta, el análisis de desempeño de la mesa indexada dentro de la celda de manufactura, con la finalidad de mostrar la eficacia y eficiencia de la autonomía de los procesos que potencialmente pudieran encajar en aplicaciones futuras. La forma en que se va a evaluar el desempeño es a través de emular una situación en donde el robot requiere tres herramientas como parte de un proceso de manufactura, por lo que este tomará y dejará las herramientas cada vez que sea necesario. Una buena calificación sería que el sistema no tenga fallas, paros no programados o eventos inesperados que detengan el ciclo. Es por ello que en los siguientes párrafos se expondrá una metodología de evaluación que mida de manera clara y objetiva su funcionamiento.

7.1 OBJETIVO:

Documentar evidencia de que de la Mesa Indexada se diseñó y construyó en cumplimiento de las especificaciones establecidas y aprobadas por el laboratorio y el alumno, y por tanto, está en condiciones de aprobarse su instalación y puesta en operación dentro de la celda de manufactura.

7.2 GENERALES

Se proyectó el desarrollo de la Mesa Indexada para automatizar diversas operaciones de manufactura que el robot pudiera desempeñar, sin necesidad de la intervención de una persona para el cambio de herramientas, y por lo tanto, dotar de capacidad para planeación de procesos de manufactura de diferente envergadura.

De acuerdo con la especificación aprobada en febrero de 2021, existirán tres de seis herramientas distintas posibles alojadas cada una en el plato giratorio de la mesa indexada, y estas estarán adaptadas mecánicamente para realizar el acople y desacople con el órgano terminal del robot o efector final, de manera que el catálogo de procesos abarque varios esquemas y amplíe las oportunidades de fabricación autónoma del robot. Para esta labor, la mesa indexada deberá desplazarse angularmente a la posición indicada por el robot, coincidiendo esta con una y solo una herramienta distinta, facilitando así la programación y requisición de herramientas por parte del usuario.

Para este caso en particular, se propuso el uso de plumones de colores como herramienta para ejecutar actividades de escritura en una superficie que estará colocada sobre la mesa de trabajo. En este sentido, el portaherramientas fue diseñado con este propósito, sin embargo, sus aplicaciones potenciales son bastantes, incluido el hecho de que será posible montar herramientas para manufactura 100% operables.

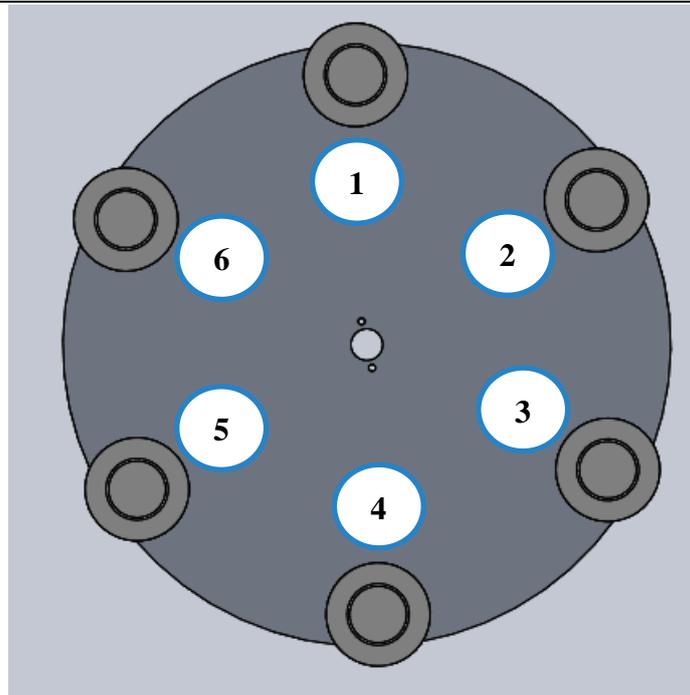


Fig. 7.1 Vista superior del plato con posiciones asignadas

7.3 PROCEDIMIENTO DE CALIFICACIÓN

01) Revisión previa de este análisis de desempeño por parte del alumno junto con los interesados del laboratorio.

02) Suministro de una muestra representativa del material con el cual se realizará la calificación (en este caso, los portaherramientas para la prueba y plumones de distintos colores).

03) Visita de inspección en las instalaciones del alumno. Todas las condiciones establecidas en este análisis de desempeño deben ser inspeccionadas y aprobadas. Las condiciones que no sean aprobadas al momento de la validación o que presenten observaciones deberán resolverse y documentarse estableciendo plazo y términos de común acuerdo con los responsables de las áreas involucradas.

El Check List estático se realizará con la máquina desenergizada y consiste en la inspección física de los componentes acordados en la especificación de diseño.

Las pruebas dinámicas se realizarán energizando la celda con ayuda del encargado de la celda de manufactura y con herramientas suficientes para emular el proceso de manufactura.

7.4 ROLES Y RESPONSABILIDADES

Nombre	Rol	Responsabilidad
A. Castilla	Alumno de posgrado	Elaboración y ejecución del análisis
Mario Peña	Asesor de tesis	Verificación y validación de la mesa indexada

Tabla 7.1 Roles y responsabilidades del proyecto

7.5 DOCUMENTACION RELACIONADA (Anexa a este documento)

- Especificación de Diseño aprobada en febrero de 2018
- Planos mecánicos
- Diagramas eléctricos
- Código de programación del DSP Y del Robot

7.6 ALCANCES Y RESTRICCIONES

La calificación del Check List Estático se limita exclusivamente para verificar que se ha completado la construcción del equipo conforme al diseño especificado y que está en condiciones de efectuarse las pruebas dinámicas. No representa por sí sólo la aprobación para validación del proyecto.

La calificación del Check List Dinámico se limita a verificar la capacidad funcional del equipo para elaborar procesos de manufactura de manera autónoma.

Se calificará positivo el cumplimiento de la especificación de Diseño y Construcción si después de aplicar Check List estático y Check List dinámico se verifica que se han cumplido las condiciones establecidas en este apartado del documento.

7.7 LISTA DE REVISIÓN ESTÁTICA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Inspección física de la construcción sin energizar:

Verificación	Criterio de calificación	OK	NC
Peso	40kg Aprox.	✓	
Bastidor	Perfil de aluminio estructural con plato giratorio	✓	
	Patas niveladoras	✓	
	Dimensiones 400mm x 400 mm x 750mm	✓	
Seguridad	Torreata con 2 colores + bocina	✓	
	E-STOP	✓	
	Interruptor Principal con fusible	✓	
Arquitectura de Control	Gabinete	✓	
	Diagramas Eléctricos y Neumáticos	✓	
	Cables y mangueras ruteadas e identificadas conforme a Diagramas eléctricos y Neumáticos	✓	
	Controlador F28379D	✓	
	Driver de motor	✓	
	Fuente de voltaje	✓	
	Paro de emergencia	✓	
	Torreata 2 colores + Bocina	✓	
	LEDS de indicación: blanco 12 VDC y azul 24 VDC		
Mecanismo indexado	Transmisión por poleas dentadas y relación 1:3	✓	
	6 nidos a medida de la especificación del portaherramienta	✓	
	Bastidor de aluminio estructural	✓	
	Soportes para baleros de plato	✓	
	Buje de plato	✓	
	Montura de encoder	✓	
	Baleros autoalineables para flechas	✓	
	Chasis de aluminio para flechas	✓	
Distribución de sensores	Sensor detección de home	✓	
	Sensor detección de herramienta	✓	
	Encoder de motor	✓	

Tabla 7.2 Check List estático

7.8 LISTA DE REVISIÓN DINÁMICA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Respuesta funcional del equipo energizado después de activar el interruptor principal:

Verificación	Criterio de calificación	OK	NC	
Servicios básicos	Energía eléctrica 120VCA + GND+N (verificar con multímetro)	✓		
	Aire comprimido limpio y seco 6 bar	✓		
	La mesa se energiza al activar el interruptor principal	✓		
	La celda a cuenta con un manómetro que indica la presión de aire	✓		
GUI	La pantalla se inicializa mostrando la interfaz y opciones de pantalla	✓		
	La interfaz responde al modo de Operación Automático	✓		
	La interfaz responde al modo de operación Manual	✓		
Torreta	La torreta se ilumina en el cambio de estado y timbra al arranque del equipo	✓		
Seguridad	La mesa se detiene al activar el paro de seguridad	✓		
	Sólo se restablece con la secuencia de restablecer seguro	✓		
Mesa Index	Tiempo de ciclo de 1.8 s. entre indexados	✓		
	Responde al modo manual y al modo automático	✓		
		Cuando el operador activa el botón de paro	✓	
	Paros debidos a alguna falla de la Máquina	Cuando falla la mesa Index	✓	
		Cuando falla robot	✓	

Tabla 7.3 Check List dinámico

7.9 Datos de placa del dispositivo

DATOS DE PLACA DEL EQUIPO	
Nombre: MESA INDEXADA	Alimentación Eléctrica: 120VCA 1FASE+GND+NE Amper Max: 1 A
Año: 2022	Alimentación Neumática: 6 Bar Consumo de aire: 1 SCFM
Núm. Serie: MESA INDEXADA IIMASUNAM 001	Sistema de Seguridad: CAT 1 / SIL1 / PLa Sistema de Control. DSP + GUI Bluetooth
Fabricante: IIMAS UNAM	Capacidad nominal: 6 herramientas de 1 kg c/u
HECHO EN MÉXICO	Peso aprox.: 40 kg
IIMAS UNAM	

Tabla 7.4 Datos de placa del dispositivo

7.10 CALIFICACIÓN DE REPETIBILIDAD, REPRODUCIBILIDAD Y DESEMPEÑO

La prueba con que se validó el equipo dentro de la celda consta de los siguientes alcances:

- Se utilizaron tres portaherramientas con plumón distinto en las posiciones 1, 2 y 3.
- La prueba se repitió un total de 12 veces, con tres velocidades distintas y cuatro muestras por velocidad, con la finalidad de obtener datos estadísticos de *repetibilidad y reproducibilidad*⁴² en la toma de la herramienta; la herramienta de medición fue un vernier y este midió la posición del centro del manipulador antes de entrar al portaherramienta con respecto al centro de la posición del portaherramienta en el plato de la mesa indexada.
- La prueba de desempeño (*OEE*²⁸) consistió en el trazado de una figura geométrica por cada plumón tomado sobre una superficie de papel, ejecutándose un total de 12 veces a una misma velocidad.

Previo a la muestra de resultados, se explican brevemente conceptos estadísticos que ayudarán a entender mejor el significado de los gráficos.

7.10.1 Concepto de repetibilidad y reproducibilidad⁴²

Repetibilidad de los resultados de las mediciones: Cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud por medir, efectuadas en las mismas condiciones de medición.

Notas:

1. Estas condiciones se llaman *condiciones de repetibilidad*.
2. Las condiciones de repetibilidad incluyen: El mismo procedimiento de medición, el mismo observador, el mismo instrumento de medición utilizado en las mismas condiciones, el mismo lugar y repetición dentro de un período de tiempo corto.
3. La repetibilidad se puede expresar en forma cuantitativa, en función de las características de dispersión de los resultados.

Reproducibilidad de los resultados de las mediciones: Cercanía entre los resultados de las mediciones de la misma magnitud por medir, efectuada bajo condiciones de medición diferentes.

Notas:

1. Para que una expresión de la reproducibilidad sea válida, es necesario especificar las condiciones que cambian.
2. Las condiciones que cambian pueden ser entre otras: el principio de medición, el método de medición, el observador, el instrumento de medición, el patrón de referencia, el lugar, las condiciones de uso y el tiempo.
3. La reproducibilidad se puede expresar en forma cuantitativa, en función de las características de dispersión de los resultados.
4. Los resultados considerados aquí son generalmente los resultados corregidos.

7.10.2 Estudio de repetibilidad y reproducibilidad

Los métodos para determinar la repetibilidad y la reproducibilidad de las mediciones están basados en la evaluación estadística de las dispersiones de los resultados, ya sea en forma de rango o su representación como varianzas o desviaciones estándar. Los métodos que se utilizan son: Rango, Promedio y Rango, y ANOVA (análisis de varianza). Para este experimento se utilizó el método de promedios y rangos, el cual determina la repetibilidad y la reproducibilidad para un sistema de medición, este método permite descomponer la variabilidad del sistema en dos componentes independientes: la repetibilidad y la reproducibilidad. El algoritmo del método es el siguiente:

1. Se establece un formato o tabla de datos para el registro de los eventos.

PRUEBAS	MESA INDEXADA		
	PORTAHERRAMIENTAS (mm)		
	1	2	3
VELOCIDAD 1: ROBOT: 10% Mesa: 33%			
VELOCIDAD 1: ROBOT: 20% Mesa: 66%			
VELOCIDAD 1: ROBOT: 35% Mesa: 100%			

Tabla 7.5 Esquema de medición de mesa indexada y herramienta

2. Con los datos del formato se calcula el rango de cada portaherramienta con la ecuación:

$$R = x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n} \dots (7.1)$$

3. Se calcula el rango promedio de cada muestreo con la siguiente ecuación:

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \dots (7.2)$$

Donde:

n : es el número de mediciones realizadas por cada muestreo.

4. Se calcula el rango promedio de todos los rangos por medio de la ecuación:

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{R}_i \dots (7.2)$$

Donde:

m : es el número de operadores y \bar{R}_i es el rango promedio de cada operador.

5. Se calcula el porcentaje de la repetibilidad de las mediciones utilizando la siguiente ecuación:

$$\%Repetibilidad = \frac{K_1 * \bar{\bar{R}}}{T} * 100\% \dots (7.4)$$

Donde:

K_1^{40} : es una constante que depende del número de mediciones realizadas por cada muestreo y proporciona un intervalo de confianza del 99% para estas características.

$\bar{\bar{R}}$: es el rango promedio de todos los rangos.

T : es la tolerancia de la característica medida, en este caso del equipo ensayado.

6. Se calcula la medición promedio de cada muestreo utilizando la ecuación:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^n x_i \dots (7.5)$$

Donde:

m es el número de ensayos por muestreo, r es el número de partes y x_i es cada una de las medidas del muestreo.

7. Se calcula la diferencia entre el promedio mayor y el promedio menor de los muestreos por medio de la ecuación:

$$\bar{x}_D = x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n} \dots (7.6)$$

8. Se calcula el porcentaje de reproducibilidad por medio de la siguiente ecuación:

$$\%Reproducibilidad = \frac{\sqrt{(K_1 * \bar{x}_D)^2 - \left(\frac{K_2 * \bar{R}}{nr}\right)^2}}{T} * 100\% \dots (7.7)$$

Donde:

K_2^{40} : es una constante que depende del número de muestreos y proporciona un intervalo de confianza del 99% para estas características.

\bar{x}_D : es la diferencia entre el promedio mayor y promedio menor de los muestreos

n : es el número de ensayos por muestreo

r : es el número de partes medidas

T : es la tolerancia de la característica medida, en este caso del equipo ensayado.

9. Se calcula el porcentaje de la relación entre la repetibilidad y reproducibilidad mediante la ecuación:

$$\%R\&R = \sqrt{(\%Repetibilidad)^2 + (\%Reproducibilidad)^2} \dots (7.8)$$

La interpretación de los resultados de esta última ecuación es⁴¹:

- a) Si $\%R\&R < 10\%$, el proceso es aceptable
- b) Si $10\% \leq \%R\&R < 30\%$, el proceso es aceptable condicionalmente como estable pero debe ser considerado un proceso de análisis para mejorarlo y establecer las causas que producen variabilidad.
- c) Si $\%R\&R > 30\%$, el proceso no es aceptable y requiere mejoras en cuanto a proceso, equipo, método, etc.

7.10.3 Estudio del desempeño del equipo OEE

El OEE³⁸ (*OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS*) o *Efectividad General del Equipo* es una métrica que mide la eficiencia operativa de los procesos. Este indicador refleja la capacidad productiva real de los equipos industriales y evidencia, si los hay, errores, malfuncionamientos, averías y otras circunstancias que a simple vista no son fáciles de detectar en un equipo o sistema. El OEE se expresa en porcentaje y su valor siempre se encuentra entre el 0% y el 100%, representando al 100% la situación óptima de producción: solo se fabrican piezas conformes a la máxima velocidad y sin paradas.

El cálculo del OEE tiene en cuenta tres variables fundamentales: Calidad, Rendimiento y Disponibilidad.

- Calidad: se obtiene a partir del cálculo de piezas conformes a la primera frente al total de piezas producidas.
- Velocidad: este parámetro indica lo fabricado (bueno y malo) durante el tiempo de operación, respecto de lo que tenía que haber fabricado a tiempo de ciclo ideal.
- Disponibilidad: resulta de dividir el tiempo de operación entre el tiempo planificado de producción.

La calidad se calcula con la ecuación:

$$\text{Calidad} = \frac{\text{Total de productos conformes}}{\text{Total de productos producidos}} * 100 \dots (7.9)$$

El rendimiento se calcula con la ecuación:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Total de producción real}}{\text{Producción teórica}} * 100 \dots (7.10)$$

La disponibilidad se calcula con la ecuación:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo total de producción}}{\text{Tiempo de Producción teórica}} * 100 \dots (7.11)$$

Finalmente, el OEE se calcula como:

$$\text{OEE} = \text{Calidad} * \text{Rendimiento} * \text{Disponibilidad} \dots (7.12)$$

La interpretación de los resultados de esta última ecuación es³⁸:

- OEE < 65% Inaceptable. Se producen importantes pérdidas económicas. Muy baja competitividad.
- 65% < OEE < 75% Regular. Aceptable sólo si se está en proceso de mejora. Pérdidas económicas. Baja competitividad.
- 75% < OEE < 85% Aceptable. Continuar la mejora para superar el 85 % y avanzar hacia la *World Class*. Ligeras pérdidas económicas. Competitividad ligeramente baja.
- 85% < OEE < 95% Buena. Entra en Valores *World Class*. Buena competitividad.
- OEE > 95% Excelencia. Valores *World Class*. Excelente competitividad.

7.10.4 Resultados de Repetibilidad y Reproducibilidad

La prueba consistió en tres fases, cada fase con cuatro pruebas iguales cada una, para un total de 12 pruebas corridas y medidas. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

PRUEBAS	MESA INDEXADA		
	PORTAHERRAMIENTAS (MM)		
	1	2	3
VELOCIDAD 1: ROBOT: 10% Mesa: 33%	0	0	0.6
	0.2	0	0
	0	0.15	0
	0	0	0.7
VELOCIDAD 2: ROBOT: 20% Mesa: 66%	0.1	0	0
	0	0.1	0
	0.1	0	0.5
	0	0	0
VELOCIDAD 3: ROBOT: 30% Mesa: 100%	0	0.1	0
	0	0	0.1
	0.1	0	0
	0	0	0

Tabla 7.6 Valores de medición de mesa indexada y herramienta

En cada fase se modificó tanto la velocidad del robot como de la mesa indexada. Cabe destacar que la velocidad máxima del robot fue del 30% debido al riesgo que este representa si se maneja a alta velocidad. Posteriormente, el cálculo del rango para cada fase quedó así:

PORTAHERRAMIENTAS	RANGO DE PRUEBAS		
	RV (1)	RV (2)	RV (3)
1	0.2	0.15	0.7
2	0.1	0.1	0.5
3	0.1	0.1	0.1

Tabla 7.7 Valores de rango por fase

El rango promedio:

RANGO PROMEDIO	
RV (1)	0.13333333
RV (2)	0.11666667
RV (3)	0.43333333

Tabla 7.8 Valores de rango promedio por fase

El rango promedio de todos los rangos:

RANGO PROMEDIO TOTAL	
RV	0.227778

Tabla 7.9 Rango promedio de todas las fases

Para esta prueba se consideró una tolerancia de ± 3 mm y una constante K_1^{40} de 2.059. Con esto, el cálculo de la repetibilidad, de acuerdo con la ecuación (4) queda:

$$\%Repetibilidad = \frac{K_1 * \bar{R}}{T} * 100\% = 15.63\%$$

La medición promedio por fase:

PROMEDIO POR VEL	
V (1)	0.1375
V (2)	0.06666667
V (3)	0.025

Tabla 7.10 Medición promedio por fase

Calculando la diferencia entre el promedio mayor y el menor:

PROM MAX - MIN
0.1125

Tabla 7.11 Diferencia entre promedio mayor y menor

De la Tabla 1, se obtiene que $K_2^{40} = 1.769$ para 3 operadores y empleando la ecuación (7), se tiene que el porcentaje de reproducibilidad es:

$$\%Reproducibilidad = \frac{\sqrt{(K_1 * \bar{x}_D)^2 - \left(\frac{K_2 * \bar{R}}{nr}\right)^2}}{T} * 100\% = 4.86\%$$

El porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad calculada por medio de la ecuación (8), es:

$$\%R\&R = \sqrt{(\%Repetibilidad)^2 + (\%Reproducibilidad)^2} = 16.37\%$$

Como el porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad es menor a 30% pero mayor a 10%, el sistema de medición es aceptable, sin embargo, necesita mejoras de diseño y de fabricación para mejorar la precisión de la posición respecto del robot.

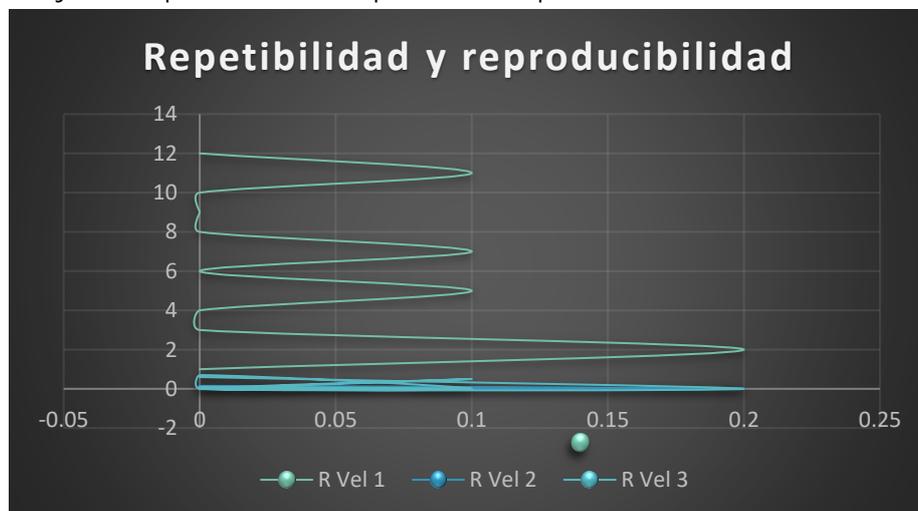


Tabla 7.12 Gráfico de repetibilidad de la posición relativa entre portaherramienta y cambio rápido

7.10.5 Resultados de desempeño del equipo OEE

La prueba consistió en ejecutar un total de 12 veces la rutina cargada en el controlador del robot considerando la máxima velocidad de ambos dispositivos y cuyos datos sirvieron para completar la tabla 7.12. Para este caso, la calidad se consideró como la cantidad de veces que el robot tomó adecuadamente la herramienta para sus tareas.

La prueba de desempeño puede visualizarse en el siguiente enlace: https://youtu.be/5C-3_JC9J_c.

Verificación	Criterio de calificación		
Procedimiento de las pruebas	La prueba se evaluará con 3 herramientas distintas		
	El tiempo de prueba será de 1 hora, con velocidad máxima en mesa indexada y velocidad de robot del 45%		
	Se dispondrá de 1 operador (alumno)		
Ejecución de las pruebas	Operadores: 1		
	1 ciclo=tiempo entre herramientas (angular)	1.8	Seg
	Tiempo total de la prueba	1	hora
	Factor de rendimiento del operador		
	Tiempo de paros planeados Limpieza Preparar equipo Otros	20	min
	Tiempo Planeado de operación =Tiempo total de la prueba-tiempo de paros planeados	40	min
	Tiempo de paros no planeados	0	min
	Paros por máquina	0	min
	Paros por operador	0	min
	Paros por material	0	min
	Tiempo de operación= Tiempo planeado de operación- Tiempo de paros no planeados	40	min
	Velocidad Nominal Máxima	1.1	ppm
	Piezas Totales	36	piezas
	Rendimiento = piezas totales / (tiempo de operación x velocidad máxima)	81.81	%
	Sujeciones conformes	35	
	Sujeciones No Conformes	1	
	Calidad =Sujeciones conformes/sujeciones totales producidas	97.22	%
	Disponibilidad = Tiempo de operación / tiempo planeado de operación	100.00	%
OEE ⁽³⁸⁾ =Disponibilidad x calidad x rendimiento	79.53	%	

Tabla 7.13 Tabla de resultados de desempeño del equipo



Fig. 7.2 Pruebas de desempeño de mesa indexada

Como el porcentaje del cálculo del desempeño se encuentra dentro del rango $65\% < OEE < 75\%$, este es aceptable solo si se está en proceso de mejora, conclusión muy parecida a la obtenida en la prueba de repetibilidad y reproducibilidad. El sistema es perfectible y necesitará mejoras en el diseño mecánico, principalmente, para llegar a tener el desempeño deseado. La tabla 7.14 ilustra el resultado obtenido de las tres variables medidas en esta prueba: (1) Disponibilidad, (2) Calidad, (3) Desempeño y (4) OEE.

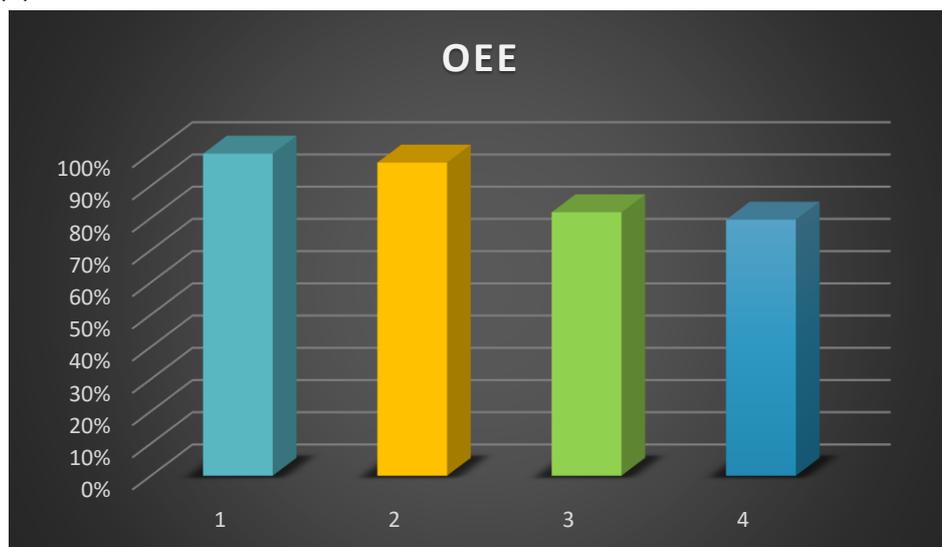


Tabla 7.14 Tabla de porcentajes de desempeño del equipo

Conclusiones y recomendaciones

El objetivo de surtir de herramientas al robot de la celda de manera autónoma y conforme a una estructura o algoritmo previamente planeado y descargado en la celda de manufactura por medio de la mesa indexada se ha cumplido de manera exitosa, pues de acuerdo con el objetivo planteado al inicio de esta tesis, los alcances cubiertos fueron:

- Se diseñó y construyó un mecanismo indexado con capacidad para seis herramientas
- Se implementó un algoritmo en el DSP con la capacidad de codificar y decodificar órdenes provenientes del controlador del robot de manera óptima
- Se integró un mecanismo de cambio rápido actuado por un cilindro neumático que toma y deja las herramientas en su posición sobre el plato indexado
- Se diseñó una rutina sencilla para tomar y dejar la herramienta en una sola posición, reduciendo tiempo de codificación y dejando mayores recursos para la generación de movimientos más útiles dentro de la celda, todo esto en el software del robot
- Se implementó el uso de una aplicación móvil para monitorear y configurar el dispositivo previo a la integración con el robot
- El uso del DSP permite la escalabilidad de nuevos procesos a ejecutar en la mesa indexada, expandiendo sus posibilidades de compatibilidad con varios elementos o componentes ajenos
- El hardware de la mesa indexada es capaz de recibir y soportar herramientas de hasta 1 kg cada una, aportando el suficiente espacio para su montaje en el plato

De los resultados de repetibilidad y desempeño obtenidos y reportados en el capítulo VII, y con base en los criterios que estos estudios establecen, se deduce que la mesa indexada cumple o está dentro de los parámetros aceptables para su operación y funcionamiento dentro de la celda, sin dejar de lado las recomendaciones mínimas necesarias para incrementar su rendimiento y confiabilidad.

Para finalizar, lo obtenido en este proyecto de investigación es resultado de un tremendo esfuerzo académico y el cual abre o da pie a un sinnúmero de implementaciones y nuevos procesos dentro de la celda de manufactura al contar ya con la infraestructura necesaria para dichos objetivos. El desarrollo de herramientas inteligentes adaptables al robot es ahora una realidad gracias a la versatilidad que la mesa indexada ofrece.

REFERENCIAS

1. Sadrfaridpour B. & Wang, Yue (2020). "Collaborative assembly in Hybrid Manufacturing". *Transactions of automation science and engineering*.
2. Grefen, P., Vanderfeesten, I., & Bouladakis, Georgios (2018). "Developing a cyberphysical system for hybrid manufacturing in an Internet-of-things- context". IGI Global.
3. Sakran, H., Majeed, H., Jafer, A. (2020). "A review of a basic concept of cellular manufacturing". *International Journal of Design and Manufacturing Technology (IJDMT)*.
4. (2022). "Teoría celdas de manufactura". Scribd. España. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/460067836/Teoria-celdas-de-manufactura>
5. Scheidl, Rudolf. (2016). "Actuators and sensors for smart systems". *International Fluid Power Conference*.
6. (2019). "Intelligent electrical actuators for process automation applications". *ABB MEASUREMENT & ANALYTICS*.
7. Thramboulidis, K., Foradis, T. (2018). "From mechatronic components to industrial automation things". *University of Patras, Greece*.
8. Williams, Andrew. (2019). "End of arm tools for robots". *Robotics Business Review*.
9. Braumann, J., & Cockcan, S. (2019). "Digital and physical tools for industrial robots in architecture: robotic interaction and interfaces". *Association for robots in architecture*.
10. Zhang, Y. & Smith, W. (2020). "Achieving multi-tasking robots in multi-robot tasks". *arXiv*.
11. Pereida, k., Helwa, M. & Schoelling, A. (2019). "Data-efficient multi-robot, multi-task transfer learning for trajectory tracking". *arXiv*.
12. Jiménez, J., Carranza, D. & Ochoa, J. (2007). "Smart: Sistemas multiagente robóticos". *Universidad Nacional de Colombia*.
13. Dagli, C. (2011). "A multi-agent framework for industrial robotic applications". *ELSEVIER*.
14. Stone, P. & Veloso, M. (2000). "Multiagent systems: a survey for machine learning perspective". *AT&T Labs*.
15. (2022). "Servomotors and servodrives". *Omron Industrial Automation. India*. Recuperado de: https://www.omron-ap.co.in/service_support/technical_guide/servo_motor_drive/index.asp
16. (2022). "Correas de transmisión: cálculo y diseño". *Ingeniería Mecánica. Sevilla, España*. Recuperado de: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html>
17. (2022). "LAUNCHXL-F28379D". *Texas Instruments. Texas, E.U.A.* Recuperado de: https://www.ti.com/product/LAUNCHXL-F28379D/part-details/LAUNCHXL-F28379D?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=ocb-tistore-promo-epd_opn_en_rsa-cpc-storeic-google-ww&utm_content=Device&ds_k=LAUNCHXL-F28379D&DCM=yes&gclid=Cj0KCQjwhqaVBhCxAARIsAHK1tiPFd_K6oQ9wseDXShxSwtpazMxTVwfFyhILG2L2BJ-1K1BBINQgajgaAiUjEALw_wcB
18. (2013). "Technical Reference Manual TMS320F2837XD Dual Core Delfino Microcontrollers". *Texas Instruments. Texas, E.U.A.* Recuperado de: <http://www.add.ece.ufl.edu/4511/references/spruhm8g%20-%20f2837x%20Manual.pdf>
19. (2019). "LAUNCHXL-F28379D Overview: User's Guide". *Texas Instruments. Texas, E.U.A.* Recuperado de: <https://www.ti.com/lit/ug/sprui77c/sprui77c.pdf?ts=1655307577531>

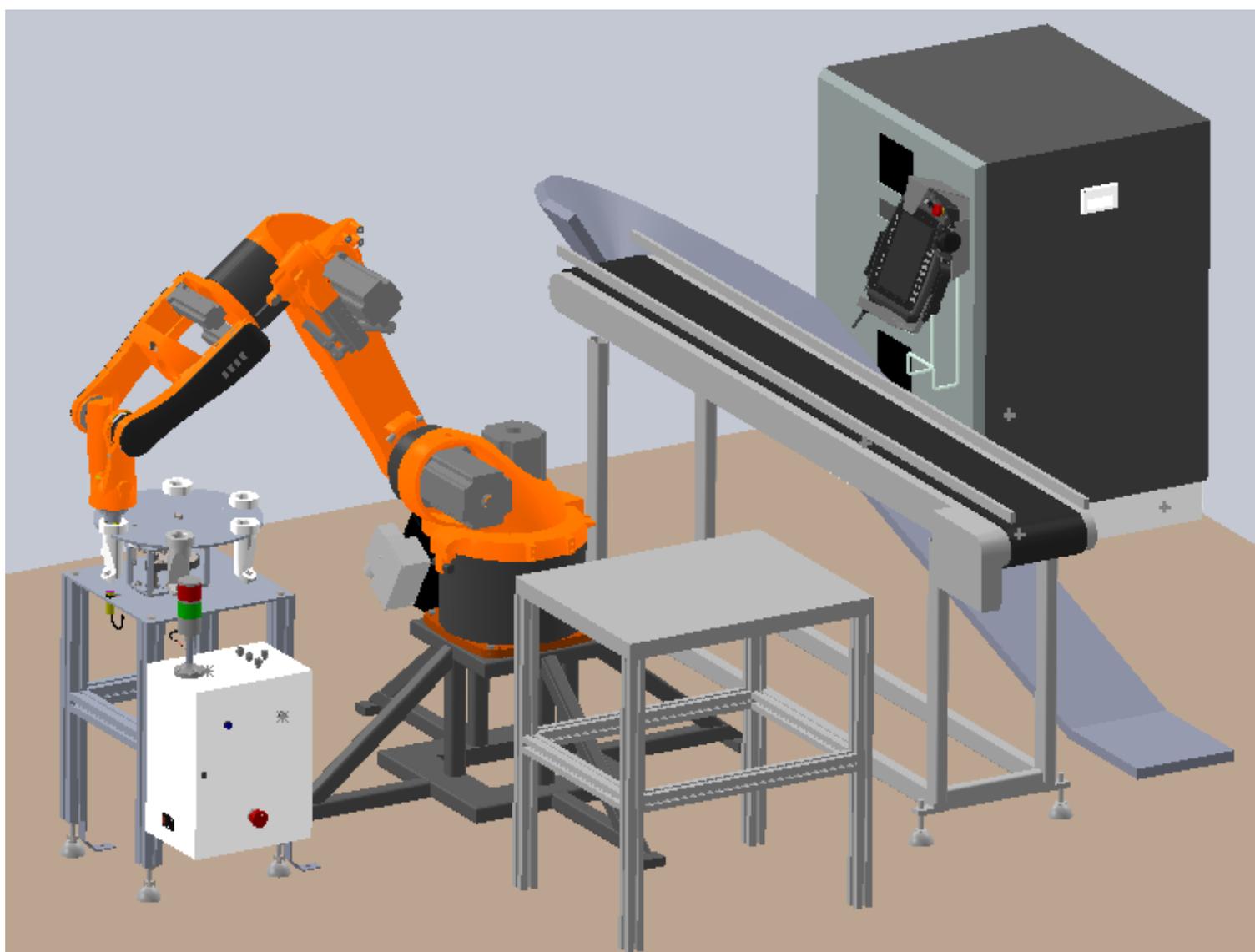
-
20. (2022). "MIT APP INVENTOR". Massachussets, E.U.A. www.appinventor.mit.edu. Recuperado de: <https://appinventor.mit.edu/>
 21. (2015). "KUKA System Software 8.3: Operating and Programming Instructions for System Integrator". KUKA Roboter GmbH. Alemania. Recuperado de: <http://www.wtech.com.tw/public/download/manual/kuka/krc4/KUKA%20KSS-8.3-Programming-Manual-for-SI.pdf>.
 22. (2015). "Arc welding and more: KR 5 arc brochure". KUKA Roboter GmbH Alemania. Recuperado de: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/pf0012_kr_5_arc_hw_en.pdf
 23. (2021). "Indexing&Transfer, Cam Driven Systems". Bagnolo Cremasco, Italia. Recuperado de <https://cdisindexers.com/producto/IT%20Series/1/>.
 24. (2022). "Rotary Indexing Tables". [Weiss-world.com/de](http://www.weiss-world.com/de). Alemania. Recuperado de: <https://www.weiss-world.com/de-en/products/rotary-indexing-tables-44>
 25. (2022). "Mesas de indexado: excelente opción para automatizar". Recuperado de: <https://urany.net/blog/mesas-de-indexado-excelente-opci%C3%B3n-para-automatizar-tus-proyectos>
 26. (2021). "CSM: Manufactura inteligente conectada". Robotics and CNC. Heredia, Costa Rica. Recuperado de: <https://roboticsandcnccenter.com/csm-manufactura-inteligente-conectada/>
 27. (2019). "Group Technology". Wayback Machine. Fairfax, E.U.A. Recuperado de: <https://web.archive.org/web/20190516063821/http://www.businessdictionary.com/definition/group-technology.html>
 28. (2021). "Las nueve etapas del proceso de producción de un automóvil". BF México. Querétaro, México. Recuperado de: <https://bfmx.com/soldadura/las-9-etapas-del-proceso-de-produccion-de-un-automovil/>
 29. (2022). "FPS: El sistema de producción de Ford Motor Co.". Haciendo más con menos. México. Recuperado de: <http://www.leanproduction.co/articulos-lean-manufacturing/empresa-lean-production/fps-el-sistema-de-produccion-de-ford-motor-co.html>
 30. (2022). "Iluminación y controles". www.eaton.com. E.U.A. Recuperado de: <https://www.eaton.com/mx/es-mx/products/lighting-controls.html>
 31. (2022). "Sistemas de posicionamiento eléctricos". Festo. Venezuela. Recuperado de: https://www.festo.com/cms/es_ve_ve/18843.htm
 32. (2021). "The 5 minutes guide to use any end effector with Robo DK". RoboDK. E.U.A. Recuperado de: <https://robodk.com/blog/robot-end-effector-guide/>
 33. (2022). "Hakko Soldering". Universal Robots. Recuperado de: <https://www.universal-robots.com/plus/products/hakko/hakko-soldering/>
 34. (2021). "What is the best end effector for robot drilling?". RoboDK. E.U.A. Recuperado de https://robodk.com/blog/end-effector-for-robot-drilling/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=end-effector-for-robot-drilling

-
35. (2022). "Abrasive waterjet cutting goes robotic". *The fabricator*. Illinois, E.U.A. Recuperado de: <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/waterjetcutting/abrasive-waterjet-cutting-goes-robotic>
36. (2022). "Función de cambio rápido". *Zimmer Group*. España. Recuperado de: <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.zimmer-group.com%2Fes%2Ftecnologias-y-componentes%2Frobotica%2Fmatch-end-of-arm-ecosystem%2Ffuncion-de-cambio-rapido&psig=AOvVaw0HNvoUj8HPV7cv5htYmP9C&ust=1655587334407000&source=images&cd=vfe&ved=0CA4Q3YkBahcKEwigvMfKtbX4AhUAAAAAHQAAAAQAw>
37. (2021). "Inteligencia artificial y robótica en la manufactura". *Ennomotive*. España. Recuperado de: <https://www.ennomotive.com/es/inteligencia-artificial-y-robotica/>
38. (2021). "¿Cómo calcular el OEE de mi fábrica". *Novus*. Recuperado de <https://www.novus.com.br/blog/como-calcular-el-oee-de-mi-fabrica-con-nuestra-hoja-de-calculo-sera-mas-facil/?lang=es#:~:text=El%20OEE%20compara%20la%20capacidad,de%20fabricaci%C3%B3n%20de%20nuevos%20productos>.
39. (2020). "Cálculo de torques en SolidWorks Simulation". *SolidWorks LATAM y España*. Recuperado de: <https://blogs.solidworks.com/solidworkslatamyesp/solidworks-blog/simulacion/calculo-de-torques-en-solidworks-simulation-2/>
40. (2015). "D2 Values for distribution of the average range appear in the following table". Recuperado de: <https://andrewmilivojevich.com/d2-values-for-the-distribution-of-the-average-range/>
41. González Rey, Gonzalo & Falcón Anaya, Christopher (2015). "Procedimiento para el análisis de repetibilidad y reproducibilidad en procesos de manufactura". RCI: Cuba.
42. (2007). "Estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTCISO/IEC 17025". UTP: Colombia.

ANEXOS

- ✓ **Cálculos de mesa indexada**
- ✓ **Desglose de presupuesto vs costo real del proyecto**
- ✓ **Código de programación del robot**

CÁLCULOS DE MESA INDEXADA



En el capítulo IV se presentó, de manera resumida, una tabla con las variables involucradas en la especificación del comportamiento mecánico de la mesa. Es así que en este apartado se visualiza el procedimiento empleado para su obtención.

Comenzando con dimensiones básicas, como diámetros, espesores, ángulos, etc., se parte para realizar los cálculos necesarios de velocidad lineal, velocidad y aceleración angular, inercia y par motor, esenciales estos para el correcto dimensionamiento y selección de componentes adecuados para la operación del mecanismo proyectado. A continuación se describe el desarrollo empleado.

- Diámetro del plato: 0.34 m
- Ángulo de recorrido: 60° (1.047 radianes)
- $X_o = r\theta$: 0.1780 m
- t_0 : Tiempo de indexado: 1.8 s
- t_A : Tiempo de aceleración/deceleración: 0.2 s

La velocidad lineal máxima, de acuerdo con la fig. 4.6 está dada por la ecuación:

$$V = \frac{X_o}{t_0 - t_A} \dots (1)$$

Sustituyendo:

$$V = \frac{0.1780 \text{ m}}{1.8 \text{ s} - 0.2 \text{ s}} = 0.1112 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Sabiendo la velocidad lineal, es relativamente sencillo conocer la angular, necesaria para dimensionar un actuador eléctrico. Esta se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V = r\omega \dots (2)$$

Donde r es el radio del plato y ω la velocidad angular. Despejando ω de la ecuación 2, se tiene:

$$\omega = \frac{V}{r} = \frac{0.11 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.17 \text{ m}} = 0.6544 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

Con la velocidad angular es posible conocer la velocidad en RPM, unidad con la que se dimensiona la velocidad de los actuadores eléctricos. Entonces, esta se calcula como:

$$\omega_{RPM} = \omega * \frac{60}{2\pi} = 6.2499 [RPM]$$

Sabiendo la velocidad en RPM, se calcula la aceleración angular, también en RPM:

$$\alpha_{RPM} = \frac{\omega_{RPM}}{t_A} = \frac{6.2499 \text{ RPM}}{0.2 \text{ s}} = 31.2496 \left[\frac{\text{RPM}}{\text{s}} \right]$$

Y la aceleración angular en radianes está dada como:

$$\alpha = \alpha_{RPM} * \frac{60}{2\pi} = 3.2724 \left[\frac{rad}{s^2} \right]$$

Este último cálculo permitirá calcular el par motor necesario para mover el mecanismo, y ayudará a la selección del actuador eléctrico. Para este cálculo se empleó *SolidWorks* ⁽³⁹⁾, dada la cantidad de variables a considerar. En este caso, al tener el diseño final completo, a través del software es posible especificar materiales, con lo que el sistema calcula pesos, fuerzas, inercias, etc. Entonces, la inercia estimada derivada de dichos materiales es:

$$I = 0.44 [kg - m^2]$$

Teniendo ya la aceleración angular estimada, se calcula entonces el par motor, que está dado por la siguiente expresión:

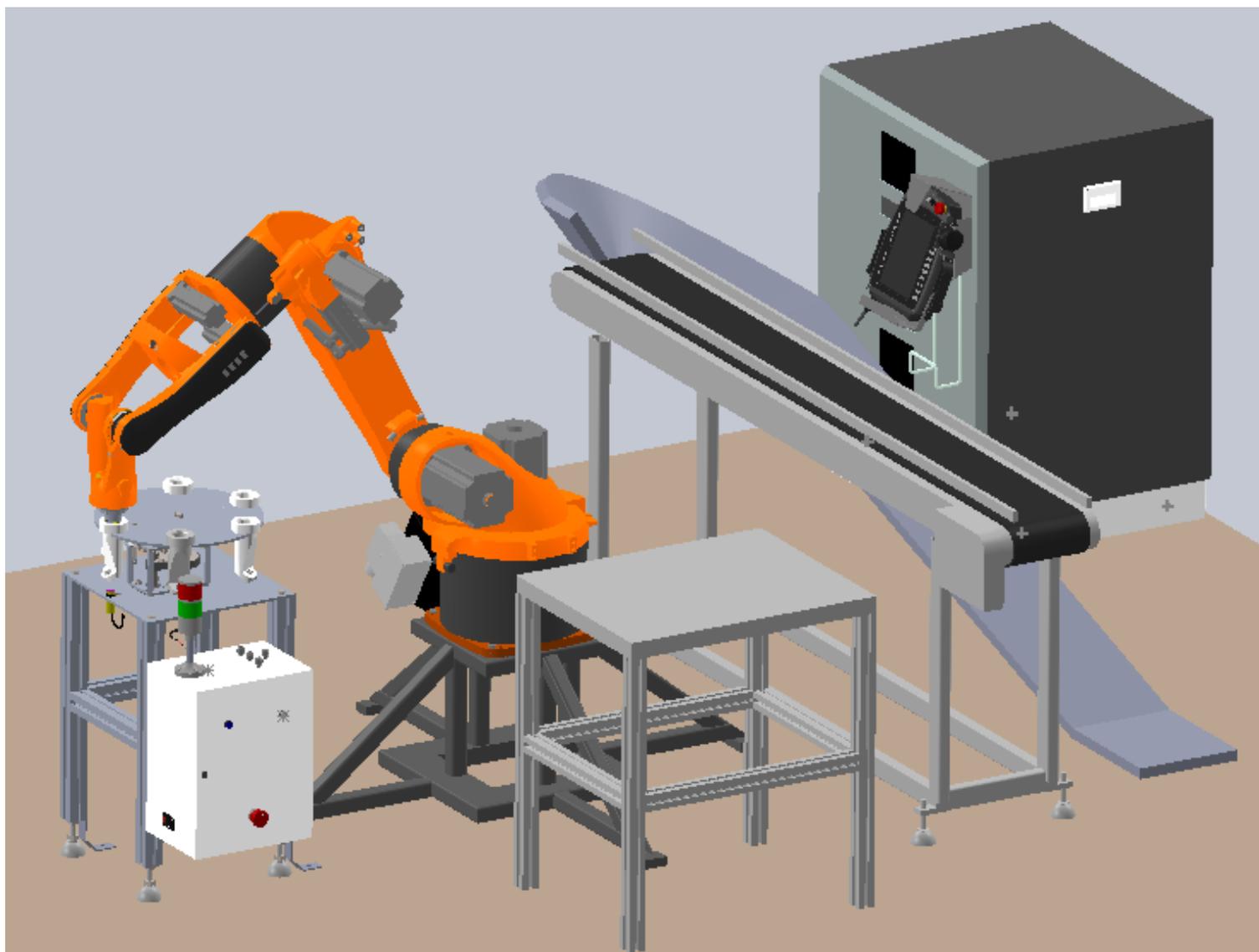
$$M = I\alpha \dots (3)$$

Sustituyendo en 3:

$$M = 0.44 [kg - m^2] * 3.2724 \left[\frac{rad}{s^2} \right] = 3.72 [Nm]$$

Este último valor se considera para el cálculo de la potencia eléctrica y demás consideraciones eléctricas, como se ilustra en la sección 4.7

DESGLOSE DE PRESUPUESTO VS COSTO REAL



Este apartado tiene como finalidad mostrar, de manera general, la parte financiera involucrada en este proyecto. Durante el desarrollo del proyecto se conceptualizó la mesa indexada y sus posibles costos como parte de un ejercicio presupuestario, el cual es una parte fundamental durante la ejecución de proyectos reales y que en muchos casos, define la viabilidad y factibilidad de un proyecto ingenieril, en este caso.

Ahora bien, el presupuesto fue compartido durante la emisión de la especificación de diseño, cuya finalidad es la de ofrecer una mejor perspectiva de lo que será, en este caso, la mesa indexada, contemplando todos o la mayoría de los componentes y elementos necesarios para su funcionamiento, así como las geometrías y materiales proyectados para su fabricación y puesta en marcha. Dado que es una aproximación, el diseño puede variar durante la etapa de ejecución, y por lo tanto, también los costos y tiempos proyectados. Sin embargo, no representan o no deberían representar un cambio sustancial o de raíz, lo que le da un papel importante a la hora de ofrecer certeza al inicio de un proyecto.

Presupuesto

El presupuesto proyectado puede ser encontrado en el anexo "Especificación de diseño" de este documento. Fue propuesto en 2021 y contemplaba lo siguiente:

Tabla de presupuestos del proyecto

ITEM	CONCEPTO	P. INICIAL	OTROS	TOTAL
1	Bastidor de mesa index	\$6,560.00	-	\$6,560.00
2	Chasis de mesa index	3,900.00	-	3,900.00
3	Transmisión de mesa index	\$10,480.00	-	\$10,480.00
4	Plato giratorio	\$4,300.00	-	\$4,300.00
5	Gabinete de control	\$3,700.00	-	\$3,700.00
TOTAL		\$28,940.00	-	\$28,940.00

Notas:

- Los montos se consideran en pesos mexicanos
- El presupuesto proyectado está basado en el concepto actual del proyecto presentado en este documento
- El presupuesto presentado es inicial y está en función del común acuerdo entre ambas partes, tutor y alumno

Cronograma de fabricación

Concepto	S3: Med.	S3: Fin	S4: Med.	S4: Fin	Observaciones
Chasis					N/A
Transmisión					N/A
Plato					N/A
Bastidor					N/A
Gabinete					N/A
Implementación					N/A
Documentación					N7A

Donde:

- S3: Med. Se refiere a la mitad del tercer semestre
- S3: Fin Se refiere al final del tercer semestre
- S4: Med. Se refiere a la mitad del cuarto semestre
- S4: Fin Se refiere al final del cuarto semestre

Ruta crítica

Actividades no críticas

El costo y tiempo reales se presentan a continuación:

Tabla de costos del proyecto

ITEM	CONCEPTO	P. INICIAL	OTROS	TOTAL
1	Bastidor de mesa index	\$3,800.00	-	\$3,800.00
2	Chasis de mesa index	\$3,900.00	-	\$3,900.00
3	Transmisión de mesa index	\$4,260.00	-	\$4,260.00
4	Plato giratorio	\$2,900.00	-	\$2,900.00
5	Gabinete de control	\$3,450.00	-	\$3,450.00
TOTAL		\$18,310.00	-	\$18,310.00

Notas:

- Los montos se consideran en pesos mexicanos
- El presupuesto proyectado está basado en el concepto actual del proyecto presentado en este documento
- El presupuesto presentado es inicial y está en función del común acuerdo entre ambas partes, tutor y alumno

El costo real resultó ser menor al proyectado, y esto se puede explicar porque se cambiaron materiales de fabricación (aluminio en vez de acero) y este resulta más fácil de maquinar y ensamblar, además del uso de una transmisión mecánica más simple y un gabinete de control más compacto. Se cambiaron algunas marcas de componentes por otras más accesibles pero conservando la misma calidad y uso, y sobre todo, un mejor diseño mecatrónico, que al depurarse, redujo sustancialmente el nivel de ensamble previamente propuesto.

Cronograma de fabricación

Concepto	S3: Med.	S3: Fin	S4: Med.	S4: Fin	Observaciones
Chasis					N/A
Transmisión					N/A
Plato					N/A
Bastidor					N/A
Gabinete					N/A
Implementación					N/A
Documentación					N7A

Donde:

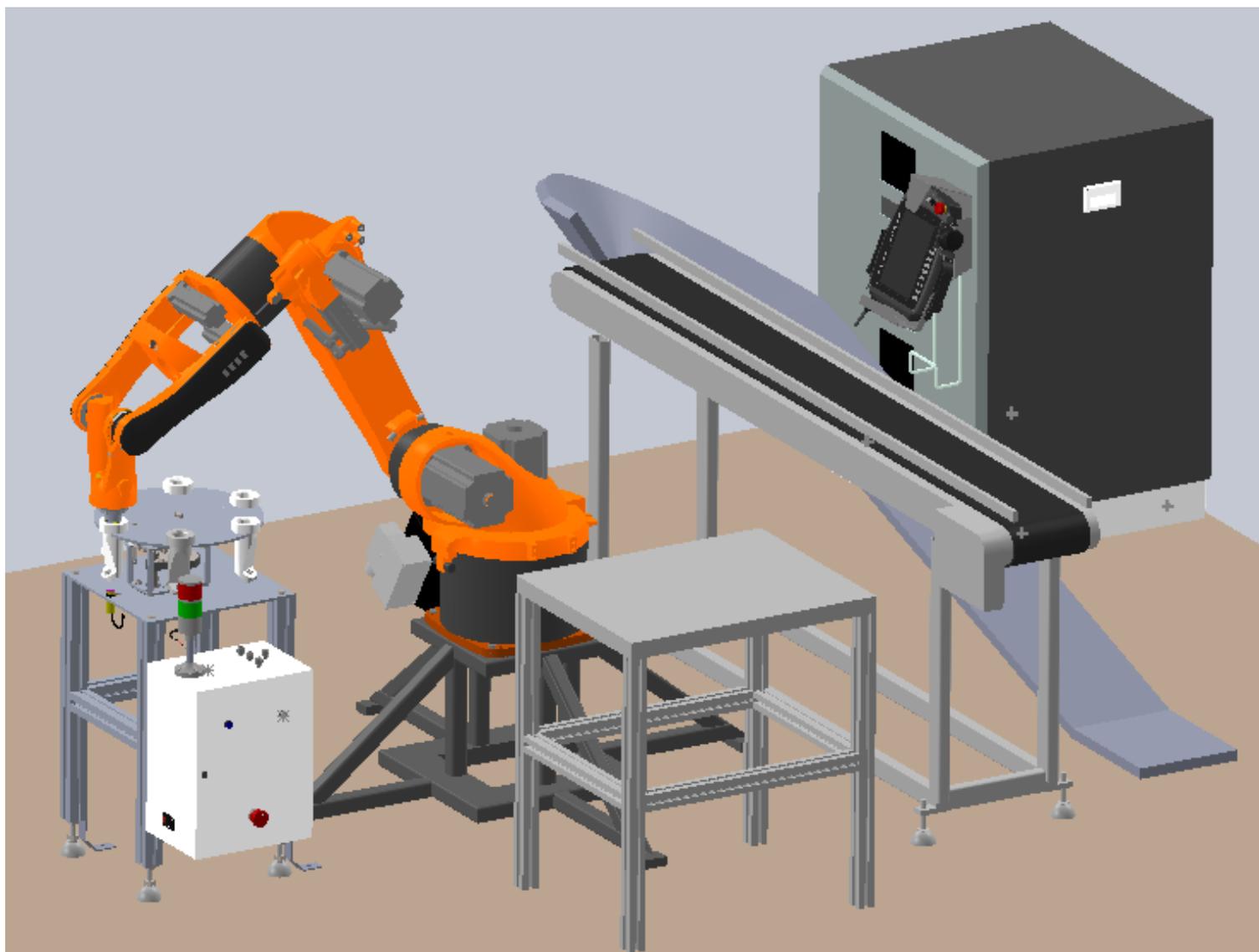
- S3: Med. Se refiere a la mitad del tercer semestre
- S3: Fin Se refiere al final del tercer semestre
- S4: Med. Se refiere a la mitad del cuarto semestre
- S4: Fin Se refiere al final del cuarto semestre

Ruta crítica

Actividades no críticas

El tiempo se mantuvo prácticamente igual que el proyectado.

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DEL ROBOT



En el capítulo V se describe el diagrama de flujo que estableció las instrucciones para la programación del robot y en el capítulo VI se desglosa resumidamente la estructura y código de programación del robot y en este anexo se visualiza más detalladamente. La interfaz de programación es el *SmartPAD* o más comúnmente conocido en la industria como *Teach pendant*, el cual posee un sistema operativo basado en Windows, lo que lo hace bastante amigable ante el usuario. A continuación se presenta el código utilizado en el proyecto.

LINEA	INSTRUCCIÓN	DESCRIPCIÓN
1	DEF mesa_indexada250822 ()	Función principal
2	INT	Inicio del programa
3	NONE	Un ciclo de máquina
4	; RESTABLECE MESA INDEXADA	Comentario
5	OUT 2 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 2 en alto
6	OUT 3 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 3 en alto
7	OUT 4 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 4 en alto
8	OUT 5 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 5 en alto
9	NONE	Un ciclo de máquina
10	WAIT Time=3 sec	Temporizador de 3 segundos
11	NONE	Un ciclo de máquina
12	; ACTIVA HOME INDEX	Comentario
13	OUT 2 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 2 en alto
14	OUT 3 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 3 en bajo
15	OUT 4 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 4 en alto
16	OUT 5 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 5 en bajo
17	NONE	Un ciclo de máquina
18	WAIT Time=20 sec	Temporizador de 20 segundos
19	NONE	Un ciclo de máquina
20	; LIMPIA HERRAMIENTAS	Comentario
21	OUT 2 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 2 en bajo
22	OUT 3 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 3 en bajo
23	OUT 4 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 4 en bajo
24	OUT 5 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 5 en alto
25	NONE	Un ciclo de máquina
26	WAIT Time=1 sec	Temporizador de 1 segundo
27	NONE	Un ciclo de máquina

28	; SELECCIONA HERRAMIENTA 1	Comentario
29	OUT 2 'Signal_out1' State=FALSE CONT	Salida 2 en bajo
30	OUT 3 'Signal_out1' State=TRUE CONT	Salida 3 en alto
31	OUT 4 'Signal_out1' State=TRUE CONT	Salida 4 en alto
32	OUT 5 'Signal_out1' State=TRUE CONT	Salida 5 en alto
33	NONE	Un ciclo de máquina
34	WAIT Time=2 sec	Temporizador de 2 segundos
35	NONE	Un ciclo de máquina
36	; INICIA MESA INDEXADA	Comentario
37	OUT 2 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 2 en alto
38	OUT 3 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 3 en alto
39	OUT 4 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 4 en alto
40	OUT 5 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 5 en bajo
41	NONE	Un ciclo de máquina
42	; ESTATUS DE MESA: IN POSITION	Comentario
42	WAIT FOR (NOT IN 'Signal_in1') AND (IN 2	Ent. 1 en bajo, Ent. 2 en alto
42	'Signal_in2') AND (NOT IN 3 'Signal_in3')	Ent. 3 en bajo
43	AND (NOT IN 'Signal_in4')	Ent. 4 en bajo
44	NONE	Un ciclo de máquina
45	WAIT Time=1 sec	Temporizador de 1 segundo
48	NONE	Un ciclo de máquina
47	; INICIA RUTINA ROBOT 1RA VEZ	Comentario
48	PTP P14 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
49	PTP P13 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
50	PTP P12 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
51	PTP P11 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
52	PTP P10 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
53	NONE	Un ciclo de máquina
54	WAIT Time=1 sec	Temporizador de 1 segundo
55	NONE	Un ciclo de máquina
56	; ACTIVA CAMBIO RÁPIDO	Comentario
57	OUT 1 'Valve' State=TRUE CONT	Salida 1 en alto
58	NONE	Un ciclo de máquina
59	WAIT Time=2 sec	Temporizador de 2 segundos

60	NONE	Un ciclo de máquina
61	PTP P15 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
62	PTP P16 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
63	PTP P17 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
64	PTP P18 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
65	PTP P19 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
66	NONE	Un ciclo de máquina
67	PROGCUADRADO02()	Ejecuta programa cuadrado
68	NONE	Un ciclo de máquina
69	; RETORNA HERRAMIENTA	Comentario
70	PTP P37VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
71	PTP P38VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
72	PTP P39VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
73	PTP P40VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
74	PTP P41 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
75	PTP P42VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
76	NONE	Un ciclo de máquina
77	WAIT Time=1 sec	Temporizador de 1 segundo
78	NONE	Un ciclo de máquina
79	; DESACTIVA CAMBIO RÁPIDO	Comentario
80	OUT 1 'Valve' State=FALSE CONT	Salida 1 en bajo
81	NONE	Un ciclo de máquina
82	WAIT Time=2 sec	Temporizador de 2 segundos
83	NONE	Un ciclo de máquina
84	PTP P43VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
85	PTP P44VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
86	PTP P45VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
87	PTP P46VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
88	NONE	Un ciclo de máquina
89	WAIT Time=2 sec	Temporizador de 2 segundos
90	NONE	Un ciclo de máquina
91	; RESTABLECE MESA INDEXADA	Comentario
92	OUT 2 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 2 en alto
93	OUT 3 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 3 en alto

94	OUT 4 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 4 en alto
95	OUT 5 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 5 en alto
96	NONE	Un ciclo de máquina
97	WAIT Time=2 sec	Temporizador de 2 segundos
98	NONE	Un ciclo de máquina
99	; LIMPIA HERRAMIENTAS	Comentario
100	OUT 2 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 2 en bajo
101	OUT 3 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 3 en bajo
102	OUT 4 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 4 en bajo
103	OUT 5 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 5 en alto
104	NONE	Un ciclo de máquina
105	WAIT Time=5 sec	Temporizador de 3 segundos
106	NONE	Un ciclo de máquina
107	; SELECCIONA HERRAMIENTA 2	Comentario
108	OUT 2 'Signal_out1' State= TRUE	Salida 2 en bajo
109	OUT 3 'Signal_out1' State= FALSE	Salida 3 en alto
110	OUT 4 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 4 en alto
111	OUT 5 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 5 en alto
112	NONE	Un ciclo de máquina
113	WAIT Time=3 sec	Temporizador de 3 segundos
114	NONE	Un ciclo de máquina
115	; INICIA MESA INDEXADA	Comentario
116	OUT 2 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 2 en alto
117	OUT 3 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 3 en alto
118	OUT 4 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 4 en alto
119	OUT 5 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 5 en bajo
120	NONE	Un ciclo de máquina
121	; ESTATUS DE INDEX: IN POSITION	Comentario
122	WAIT FOR (NOT IN 'Signal_in1')AND(IN 2	Ent. 1 en bajo, Ent. 2 en alto
122	'Signal_in2') AND (NOT IN3 'Signal_in3')	Ent. 3 en bajo
122	AND (NOT IN 'Signal_in4')	Ent. 4 en bajo
123	NONE	Un ciclo de máquina
124	WAIT Time=1 sec	Temporizador de 1 segundo
125	NONE	Un ciclo de máquina

126	; INICIA RUTINA ROBOT 2DA VEZ	Comentario
127	PTP P26 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
128	PTP P27VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
129	PTP P28VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
130	PTP P29VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
131	NONE	Un ciclo de máquina
132	WAIT Time=1 sec	Temporizador de 1 segundo
133	NONE	Un ciclo de máquina
134	; ACTIVA CAMBIO RÁPIDO	Comentario
135	OUT 1 'Valve' State=TRUE CONT	Salida 1 en alto
136	NONE	Un ciclo de máquina
137	WAIT Time=2 sec	Temporizador de 2 segundos
138	NONE	Un ciclo de máquina
139	PTP P32VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
140	PTP P33VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
141	PTP P34VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
142	PTP P35VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
143	PTP P36VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
144	NONE	Un ciclo de máquina
145	PROG_CIRCULO02()	Ejecuta programa círculo
146	NONE	Un ciclo de máquina
147	; RETORNA HERRAMIENTA	Comentario
148	PTP P48VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
149	PTP P49VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
150	PTP P50VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
151	PTP P51VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
152	PTP P52VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
153	PTP P53VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
154	NONE	Un ciclo de máquina
155	WAIT Time=1 sec	Temporizador de 1 segundo
156	NONE	Un ciclo de máquina
157	; DESACTIVA CAMBIO RÁPIDO	Comentario
158	OUT 1 'Valve' State=FALSE CONT	Salida 1 en bajo

159	NONE	Un ciclo de máquina
160	WAIT Time=2 sec	Temporizador de 2 segundos
161	NONE	Un ciclo de máquina
162	PTP P54VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
163	PTP P55VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
164	PTP P56VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
165	PTP P57VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
166	NONE	Un ciclo de máquina
167	WAIT Time=5 sec	Temporizador de 5 segundos
168	NONE	Un ciclo de máquina
169	; RESTABLECE MESA INDEXADA	Comentario
170	OUT 2 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 2 en alto
171	OUT 3 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 3 en alto
172	OUT 4 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 4 en alto
173	OUT 5 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 5 en alto
174	NONE	Un ciclo de máquina
175	WAIT Time=2 sec	Temporizador de 2 segundos
176	NONE	Un ciclo de máquina
177	; LIMPIA HERRAMIENTAS	Comentario
178	OUT 2 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 2 en bajo
179	OUT 3 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 3 en bajo
180	OUT 4 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 4 en bajo
181	OUT 5 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 5 en alto
182	NONE	Un ciclo de máquina
183	WAIT Time=5 sec	Temporizador de 5 segundos
184	NONE	Un ciclo de máquina
185	; SELECCIONA HERRAMIENTA 3	Comentario
186	OUT 2 'Signal_out1' State= FALSE	Salida 2 en bajo
187	OUT 3 'Signal_out1' State= FALSE	Salida 3 en alto
188	OUT 4 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 4 en alto
189	OUT 5 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 5 en alto
190	NONE	Un ciclo de máquina
191	WAIT Time=3 sec	Temporizador de 3 segundos
192	NONE	Un ciclo de máquina

193	; INICIA MESA INDEXADA	Comentario
194	OUT 2 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 2 en alto
195	OUT 3 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 3 en alto
196	OUT 4 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 4 en alto
197	OUT 5 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 5 en bajo
198	NONE	Un ciclo de máquina
199	; ESTATUS DE INDEX: IN POSITION	Comentario
200	WAIT FOR (NOT IN 'Signal_in1')AND(IN 2	Ent. 1 en bajo, Ent. 2 en alto
200	'Signal_in2') AND (NOT IN3 'Signal_in3')	Ent. 3 en bajo
200	AND (NOT IN 'Signal_in4')	Ent. 4 en bajo
201	NONE	Un ciclo de máquina
202	WAIT Time=1 sec	Temporizador de 1 segundo
203	NONE	Un ciclo de máquina
204	; INICIA RUTINA ROBOT 3RA VEZ	Comentario
205	PTP P26 VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
206	PTP P27VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
207	PTP P28VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
208	PTP P29VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
209	NONE	Un ciclo de máquina
210	WAIT Time=1 sec	Temporizador de 1 segundo
211	NONE	Un ciclo de máquina
212	; ACTIVA CAMBIO RÁPIDO	Comentario
213	OUT 1 'Valve' State=TRUE CONT	Salida 1 en alto
214	NONE	Un ciclo de máquina
215	WAIT Time=2 sec	Temporizador de 2 segundos
216	NONE	Un ciclo de máquina
217	PTP P32VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
218	PTP P33VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
219	PTP P34VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
220	PTP P35VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
221	PTP P36VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
222	NONE	Un ciclo de máquina
223	PROG_CIRCULO05()	Ejecuta programa círculo

224	NONE	Un ciclo de máquina
225	; RETORNA HERRAMIENTA	Comentario
226	PTP P48VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
227	PTP P49VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
228	PTP P50VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
229	PTP P51VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
230	PTP P52VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
231	PTP P53VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
232	NONE	Un ciclo de máquina
233	WAIT Time=1 sec	Temporizador de 1 segundo
234	NONE	Un ciclo de máquina
235	; DESACTIVA CAMBIO RÁPIDO	Comentario
236	OUT 1 'Valve' State=FALSE CONT	Salida 1 en bajo
237	NONE	Un ciclo de máquina
238	WAIT Time=2 sec	Temporizador de 2 segundos
239	NONE	Un ciclo de máquina
240	PTP P54VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
241	PTP P55VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
242	PTP P56VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
243	PTP P57VEL=100% PDAT14 Tool[1]:prueba Base[0]	Comando PTP
244	NONE	Un ciclo de máquina
245	WAIT Time=5 sec	Temporizador de 5 segundos
246	NONE	Un ciclo de máquina
247	NONE	Un ciclo de máquina
248	; DETÉN MESA INDEXADA	Comentario
249	OUT 2 'Signal_out1' State= FALSE	Salida 2 en bajo
250	OUT 3 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 3 en alto
251	OUT 4 'Signal_out1' State=TRUE	Salida 4 en alto
252	OUT 5 'Signal_out1' State=FALSE	Salida 5 en bajo
253	NONE	Un ciclo de máquina
254	END	Fin de ciclo