



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y MANUFACTURA**



**TITULO**

Aplicación de metodología de diseño de producto para el desarrollo de una  
estación didáctica

PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN QUE PRESENTA:

**ALBERTO SOLTERO MARTÍNEZ**

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA EN MANUFACTURA**

**ASESOR**

**DR. YAHIR DE JESUS MARIACA BELTRAN**



# Índice general

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introducción</b>                                                   | <b>1</b>  |
| 1.1. Antecedentes . . . . .                                              | 2         |
| 1.2. Planteamiento del problema . . . . .                                | 6         |
| 1.3. Objetivo general . . . . .                                          | 7         |
| 1.3.1. Objetivos particulares . . . . .                                  | 7         |
| 1.4. Hipótesis . . . . .                                                 | 7         |
| 1.5. Justificación . . . . .                                             | 7         |
| 1.6. Alcances y delimitaciones . . . . .                                 | 8         |
| 1.7. Cronograma de actividades . . . . .                                 | 8         |
| <b>2. Revisión de Literatura</b>                                         | <b>10</b> |
| 2.1. Sensores . . . . .                                                  | 11        |
| 2.1.1. Magnitudes físicas . . . . .                                      | 11        |
| 2.1.2. Características de los sensores . . . . .                         | 14        |
| 2.1.3. Clasificación de sensores . . . . .                               | 20        |
| 2.1.4. Tipos de sensores . . . . .                                       | 21        |
| 2.2. Actuadores . . . . .                                                | 29        |
| 2.2.1. Clasificación de actuadores . . . . .                             | 30        |
| 2.2.2. No linealidades . . . . .                                         | 42        |
| 2.2.3. Criterio para la selección de actuadores . . . . .                | 44        |
| <b>3. Desarrollo</b>                                                     | <b>47</b> |
| 3.1. Sistemas mecatrónicos vs sistemas ciber físicos . . . . .           | 48        |
| 3.1.1. Diferencias entre sistemas mecatrónicos y ciber físicos . . . . . | 49        |

|                                                          |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2. Metodología de diseño . . . . .                     | 52        |
| 3.2.1. Diseño de sistemas mecatrónicos y CPS . . . . .   | 55        |
| 3.3. Modelo V . . . . .                                  | 56        |
| <b>4. Resultados</b>                                     | <b>59</b> |
| 4.1. Consideraciones de diseño y funcionalidad . . . . . | 59        |
| 4.1.1. Funcionalidad . . . . .                           | 61        |
| 4.2. Diseño conceptual . . . . .                         | 62        |
| 4.2.1. Subestaciones . . . . .                           | 62        |
| 4.3. Diseño detallado . . . . .                          | 64        |
| 4.3.1. Estructura general . . . . .                      | 64        |
| 4.3.2. Pick and place . . . . .                          | 66        |
| 4.3.3. Feeding . . . . .                                 | 69        |
| 4.3.4. Indexer . . . . .                                 | 69        |
| 4.3.5. Processing . . . . .                              | 70        |
| 4.3.6. Validation . . . . .                              | 71        |
| 4.3.7. Transportation . . . . .                          | 72        |
| 4.3.8. Classification . . . . .                          | 73        |
| 4.3.9. Placa neumática y de control . . . . .            | 74        |
| 4.3.10. Ayudas visuales . . . . .                        | 77        |
| 4.3.11. Ensamble general . . . . .                       | 80        |
| 4.4. Modelado y simulación . . . . .                     | 81        |
| 4.4.1. Análisis mecánico . . . . .                       | 81        |
| <b>5. Conclusión</b>                                     | <b>84</b> |

# Índice de figuras

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Funcionamiento de los sensores fotoeléctricos. . . . .                           | 22 |
| 2.2. Ejemplos de sensores resistivos. . . . .                                         | 24 |
| 2.3. Principio de funcionamiento de los sensores de proximidad capacitivos. . . . .   | 24 |
| 2.4. Reed switch normalmente abierto y cerrado. . . . .                               | 27 |
| 2.5. Fibra óptica individual y bifurcada. . . . .                                     | 29 |
| 2.6. Clasificación de actuadores según su alimentación. . . . .                       | 30 |
| 2.7. Diagrama para la selección de actuadores [62] . . . . .                          | 45 |
| 3.1. Relación entre electromecánica y controlmecánica. . . . .                        | 49 |
| 3.2. Relación entre electromecánica y controlmecánica. . . . .                        | 50 |
| 3.3. Arquitectura de los CPS actuales vs los futuros [88] . . . . .                   | 51 |
| 3.4. Metodología de diseño mediante adaptación de conceptos anteriores [101]. . . . . | 54 |
| 3.5. Modelo V mecatrónico según la directriz VDI 2206 [104]. . . . .                  | 56 |
| 4.1. <i>Layout del 'diseño original' del módulo didáctico.</i> . . . .                | 63 |
| 4.2. <i>Estructura general del módulo didáctico.</i> . . . .                          | 65 |
| 4.3. <i>Vista posterior de la estructura general.</i> . . . .                         | 66 |
| 4.4. <i>Vista general del pick and place.</i> . . . .                                 | 67 |
| 4.5. (A) Inicio (B) Contenedor de rechazo (C) <i>Feeder</i> . . . . .                 | 68 |
| 4.6. Base de inicio del módulo. . . . .                                               | 68 |
| 4.7. Diseño de subestación feeder. . . . .                                            | 69 |
| 4.8. Diseño de subestación <i>indexer</i> . . . . .                                   | 70 |
| 4.9. Diseño de subestación <i>processing</i> . . . . .                                | 71 |
| 4.10. Diseño de subestación <i>validation</i> . . . . .                               | 72 |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.11. Diseño de subestación <i>transportation</i> . . . . .          | 73 |
| 4.12. Diseño de subestación <i>classification</i> . . . . .          | 74 |
| 4.13. Diseño de la placa neumática y de control. . . . .             | 75 |
| 4.14. Torreta indicadora de estado actual de máquina. . . . .        | 78 |
| 4.15. Ejemplo de led indicadores. . . . .                            | 79 |
| 4.16. Ubicación de amplificadores y controlador multisensor. . . . . | 79 |
| 4.17. Ubicación de la HMI. . . . .                                   | 80 |
| 4.18. Vista isométrica y frontal del ensamble general. . . . .       | 80 |
| 4.19. Deformación total de la estructura. . . . .                    | 82 |
| 4.20. Estrés de Von Mises de la estructura. . . . .                  | 82 |
| 4.21. Factor de seguridad de estrés en la estructura. . . . .        | 83 |
| 4.22. Vida de la estructura. . . . .                                 | 83 |

# Índice de tablas

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Lista de magnitudes físicas. . . . .                                                         | 14 |
| 2.2. Factores que afectan el funcionamiento de un sensor inductivo. . . . .                       | 25 |
| 2.3. Características de los motores de DC. . . . .                                                | 31 |
| 2.4. Características de los motores de AC. . . . .                                                | 32 |
| 2.5. Diferencias entre servomotores eléctricos y de fluido. . . . .                               | 33 |
| 2.6. Ventajas y desventajas de los actuadores neumáticos. . . . .                                 | 34 |
| 2.7. Ventajas y desventajas de los actuadores hidráulicos. . . . .                                | 35 |
| 2.8. Ventajas y desventajas de los actuadores piezoeléctricos. . . . .                            | 37 |
| 2.9. Ventajas y deventajas de los actuadores de aleación con memoria de forma<br>térmica. . . . . | 38 |
| 2.10. Ventajas y desventajas de los actuadores magnetostrictivos. . . . .                         | 39 |
| 2.11. Ventajas y desventajas de los sensores de expansión térmica. . . . .                        | 40 |
| 2.12. Ventajas y desventajas de los actuadores piezocerámicos. . . . .                            | 41 |
| 2.13. Ventajas y desventajas de los actuadores electroquímicos . . . . .                          | 41 |
| 2.14. Ventajas y desventajas de los microactuadores. . . . .                                      | 42 |
| 2.15. Criterios para la selección de actuadores. . . . .                                          | 46 |
| 3.1. Diferencias entre sistema mecatrónico y CPS. . . . .                                         | 51 |
| 4.1. Salidas del módulo didáctico. . . . .                                                        | 76 |
| 4.2. Entradas del módulo didáctico. . . . .                                                       | 77 |

# Capítulo 1

## Introducción

La industria 4.0 tiene la finalidad de que, en un futuro, las industrias construyan redes globales generando sistemas ciber físicos con el fin de conectar maquinaria, fabricas e instalaciones de almacenamiento, para comunicarlos y controlarlos de manera inteligente, lo que permitiría compartir información que a su vez desencadena acciones en los procesos [1]. Estos sistemas utilizan controladores como los PLC (Controlador Lógico Programable, por sus siglas en inglés) el cual ha sido un factor clave para encaminar a las industrias a su modernización total. Este dispositivo electrónico permite automatizar los procesos con un bajo costo de mantenimiento, asimismo, la programación e implementación de este no es complejo y es de ejecución rápida. Cabe resaltar, que estas son las razones por las que son ampliamente utilizados en los procesos de enseñanza.

En diversas universidades durante el proceso de formación, la práctica juega un rol fundamental para el aprendizaje final de los conceptos adquiridos. Un conocimiento teórico sólido acompañado de una amplia experimentación es la clave para preparar futuros ingenieros con alta competitividad [2]. De igual manera, los estudiantes deben ser expuestos a aplicaciones industriales o a cualquier riesgo de la vida real como preparación para los ambientes de trabajo [3]. El entrenamiento enfocado a futuros especialistas responsables del diseño, manufactura y operación de sistemas electromecánicos es un verdadero reto educativo [4]. Por lo que, para este proyecto se propone el diseño y programación de un módulo didáctico de automatización que ofrece una posible solución a los problemas y dificultades que normalmente existen en las

operaciones de diseño y proceso en sistemas industriales las cuales, en la mayoría de los casos, los estudiantes de ingeniería no pueden solucionar al culminar su proceso de formación escolar. Existen diversas restricciones que se deben cumplir al diseñar un módulo didáctico específicamente dirigido para el laboratorio de una universidad. Una de las más importantes es considerar el espacio del laboratorio, ya que las universidades clase media tienden a utilizar estos espacios para cursos de enseñanza e investigaciones. De igual manera, es importante para el diseño del módulo que tenga la capacidad de ser utilizado para diferentes niveles de enseñanza, desde básico hasta avanzado [5].

## 1.1. Antecedentes

Se encuentra reportado en la literatura diversos estudios que se enfocan en la aplicación de los sistemas de control lógico así como su implementación en estaciones neumáticas. A continuación, se presenta una redacción basada en un compendio de investigaciones científicas y trabajos que tratan tópicos tales como: relevancia de los PLC en la industria 4.0, comprobar la eficacia del control mediante un PLC, los procesos industriales en distintas aplicaciones, donde se toma como base una problemática específica y desarrollando metodologías que pueden adaptarse para cualquier actividad científica.

La industria es parte de la economía que produce bienes materiales a través de procesos altamente mecanizados y automatizados [6]. Para aumentar su eficiencia la tendencia actual de las empresas se dirige hacia la digitalización avanzada y la automatización de tecnologías en la industria manufacturera e incluye principalmente tecnologías habilitadoras como los sistemas ciber físicos (CPS, por sus siglas en inglés), Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y la computación en la nube [7–11]. Esta tendencia tecnológica es denominada como Industria 4.0'.

La Industria 4.0 representa la evolución tecnológica de los sistemas integrados a los sistemas ciberfísicos. En esta etapa, los sistemas integrados, la comunicación semántica de máquina a máquina, las tecnologías IoT y CPS están integrando el espacio virtual con el mundo físico. Esta integración esta propiciando la generación de fábricas inteligentes, con el fin de hacer

frente a la complejidad de la producción en el entorno ciberfísico [12]. Debido a lo anterior, se espera que la industria 4.0 tenga un impacto significativo en cadenas de suministro, modelos de negocio y procesos [13]. No obstante, diversas empresas se enfrentan al reto de evaluar la diversidad de desarrollos y conceptos resumidos bajo el término Industria 4.0 y desarrollar sus propias estrategias corporativas [14]. Las empresas con tecnologías locales intentan reformar sus operaciones de acuerdo con las tecnologías emergentes para mantenerse competitivas y sobrevivir en el mercado [15].

Los controles industriales y, en particular, los controladores PLC constituyen actualmente una base tecnológica importante para la automatización de procesos industriales. Incluso en la era de la industria 4.0, se puede suponer que estos controladores seguirán siendo necesarios en gran medida para la producción del mañana [16]. Esto se debe a que el mantenimiento de parámetros constantes, repetibles y precisos de los procesos industriales con la dinámica requerida de ejecución y tomando en consideración todos los impactos negativos que pueden causar interrupciones, conduce a una eliminación consistente del factor humano en la realización de numerosas tareas repetitivas y tediosas, así como en la limitación del trabajo humano en las responsabilidades generales de supervisión y toma de decisiones [4].

Hoy en día, los estudios de ingeniería no pueden limitarse a una sola disciplina y los ingenieros mecánicos modernos, en lugar de tener un conocimiento estrecho sobre cómo transformar las señales de entrada en la salida, deberían tener una visión de la electrónica y el control de máquinas [17]. El diseño de sistemas electroneumáticos y electrohidráulicos se complica sin el conocimiento de las técnicas de microprocesamiento y sin aprender a diseñar sistemas de control eléctrico o programar PLC lógicos [18, 19]. Esta gran dinámica del crecimiento industrial demanda a las universidades incrementar su nivel educativo, buscando constantemente habilidades de aprendizaje más efectivas que ofrezcan un desarrollo integral a los futuros ingenieros que enfrentarán procesos más coherentes con la realidad [2].

La creación de un módulo didáctico de automatización ofrece posibles soluciones a los problemas y dificultades que normalmente se encuentran en el proceso de diseño y operación de sistemas industriales, situaciones que los estudiantes de ingeniería, en la mayoría de los casos,

no llegan a resolver luego de su proceso de formación [2]. Al diseñar un módulo didáctico para el aprendizaje de sistemas basados en PLC, los estudiantes pueden comprender los conceptos teóricos y la aplicación real del control de procesos [20]. En consecuencia, los estudiantes pueden tener acceso a metodologías similares que se utilizan actualmente en la industria [21].

En general, los módulos didácticos basados en PLC tienen diversos enfoques, no solamente en la enseñanza de PLC, si no en otros temas relacionados. En la actualidad, existe una gran variedad de empresas dedicadas al diseño y fabricación de módulos didácticos para la educación. Entre los más destacados se encuentran Festo, Siemens, Lab-Volt y National Instruments, que han desarrollado energías alternativas y renovables, cadenas productivas, automatización y robótica, modelos eléctricos y electrónicos, entre otros [2].

Por mencionar algunos de los módulos didácticos desarrollados recientemente, Bustamante et al crearon un módulo enfocado en la enseñanza de visión y PLC [2]. En su investigación proponen implementar cuatro bloques: el principal siendo la estructura mecánica y el resto siendo visión artificial, PLC y una interfaz de comunicación que en conjunto simulan un proceso industrial. Los estudiantes mostraron gran interés con la idea y lo catalogaron como novedoso y destacaron la importancia de integrar un sistema con diferentes procesos que normalmente son enseñados individualmente. Asimismo, se realizaron pruebas de percepción del aprendizaje con alumnos pertenecientes al programa de investigación en visión artificial y robótica. Finalmente, el uso del módulo se evaluó como excelente para el 90 % de los estudiantes.

De la misma forma, Chávez y Díaz [5] diseñaron e implementaron un módulo didáctico con interfaz manual, interfaz de PLC e interfaz serial por computadora. Enfocaron el proyecto en la enseñanza del control de flujo y el nivel de un proceso utilizando diferentes técnicas como control On / Off, control PID, control en cascada, entre otros. Los interruptores de nivel industrial, el medidor de flujo y el medidor de nivel ultrasónico se utilizan como sensores para brindar a los estudiantes una experiencia de primera mano con equipos industriales. Finalmente, Se realizó una prueba funcional y el sistema funcionó correctamente. Lamentablemente, este solamente funciona conectado con los PLC de un laboratorio, por lo que si no se cuenta con un PLC propio, el sistema queda inutilizable.

Sin embargo, Alszer y krystek [23] demuestran la relevancia del proceso de planeación a través de llevar a cabo dos experimentos, siendo que solamente en uno de ellos se asume un proceso de planeación propio. Este experimento se realizó en un modulo didáctico el cual es un sistema flexible de manufactura destinado a la producción de surtidos y versiones múltiples. La investigación demostró que tanto la planificación de requisitos de materiales como el proceso de secuenciación de los discos de entrada son importantes para minimizar el tiempo total de ejecución de las órdenes de producción.

Otro de los enfoques que se le dieron a los módulos didácticos es en la informática aplicada. En la investigación de Cristoltean y Silea [22] se desarrolló un equipo que se le denominó 'pelota y plato'. Este sistema puede ser utilizado como equipo de laboratorio con el fin de ayudar a estudiantes a ver que una de las tareas de un ingeniero en automatización es interconectar diferentes elementos (hardware y software). El sistema esta conectado vía bluetooth con un teléfono móvil para que el usuario envíe comandos al equipo y visualizar dónde está posicionada la pelota en el plato. Otra de las funciones consiste en enviar datos a una PC y dibujar gráficos en tiempo real referentes a la evolución de la posición de la pelota. El sistema solamente fue probado funcionalmente, y no se realizó un estudio relacionado al impacto que tiene en la enseñanza de aspectos relacionados con la automatización.

Por otra parte, en el artículo de Khairudin y Abu-Samah [24] se realizó un estudio en el que se implementa una metodolgia para la enseñanza de PLC. El método consiste en un curso de 14 semanas, donde estudiantes de tres cohortes estudian la parte teórica de los sistemas basados en PLC, seguido de aprender a programar en la plataforma de SIEMENS TIA-Portal, posteriormente, realizan una experimentación práctica sobre resolución de problemas y cableado, hasta concluir con dos exámenes, uno teórico y otro de simulación, y la presentación del diseño de un prototipo de un módulo didáctico basado en PLC. Los estudiantes dieron una buena retroalimentación a través de la evaluación estudiantes-profesor y la evaluación del curso. Las mejoras en las calificaciones de los estudiantes de la cohorte A a la C indicaron que la comprensión general de los estudiantes ha mejorado. Cabe resaltar, que todos los estudiantes fueron capaces de producir prototipos didácticos funcionales en un tiempo limitado.

La investigación de Da'na et al. [25] plantea el diseño e implementación de una plataforma para monitorear y controlar remotamente procesos basados en PLC sobre TCP / IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol, por sus siglas en inglés), un protocolo para comunicación en redes que permite que un equipo pueda comunicarse dentro de una red, o usando la red GSM (Sistema Global de Comunicaciones Móviles, por sus siglas en inglés), una red de telefonía móvil. La plataforma se construyó utilizando un PLC estándar de la industria y programada con el software Siemens Step 7. El sistema se probó en una máquina clasificadora industrial en un laboratorio, el cual resultó en un desempeño satisfactorio. La arquitectura propuesta y los resultados demuestran la viabilidad de utilizar protocolos TCP / IP y GSM para comunicarse de manera efectiva con los PLC con respecto a ambas funciones, de monitoreo y control.

A pesar de que existen investigaciones con objetivos similares al proyecto propuesto, este se diferencia en la metodología que se plantea para la enseñanza de PLC. También, se introducen nuevas tecnologías que no se han propuesto en otros módulos didácticos que se han desarrollado. Algunas de las tecnologías que se implementarán en el presente proyecto son: el marcado láser, la comunicación y control de los sistemas eléctricos y neumáticos por medio de un controlador PLC inalámbrico y una interfaz HMI (interfaz hombre máquina, por sus siglas en inglés).

## 1.2. Planteamiento del problema

Actualmente, el sector industrial se encuentra en la posición de no encontrar ingenieros con las aptitudes requeridas para satisfacer sus necesidades empresariales. Esto se debe a la mala comunicación entre industrias y academias respecto a los ingenieros que se forman y lo que las empresas requieren. Dado esto, es altamente necesario que desde la academia se incentive el uso de tecnologías, en este caso el control por PLC, para darle un acercamiento realista a los futuros profesionistas de lo que se van a encontrar en la industria.

## 1.3. Objetivo general

Diseñar estación didáctica mediante la aplicación de la metodología de diseño de producto “Modelo V” y análisis estructural por medio del elemento finito.

### 1.3.1. Objetivos particulares

- Determinar los requerimientos del módulo mediante el análisis de módulos existentes.
- Determinar el diseño conceptual del módulo mediante la revisión de literatura y tecnologías existentes.
- Desarrollar el diseño detallado del módulo mediante el *software Solidworks*.
- Simular el análisis estructural del módulo mediante el *software ANSYS*.

## 1.4. Hipótesis

Al finalizar el presente trabajo se obtendrá el diseño de un módulo didáctico para la enseñanza de PLC que cumpla con las características innovador, modular intuitivo y robusto.

## 1.5. Justificación

Existe una clara desinformación sobre la mecatrónica en México y la disponible se encuentra fragmentada e incompleta. Debido a esta falta de información objetiva, incluyendo la de los canales oficiales de información en México como lo es el INEGI, otras fuentes como la revista 'Manufactura' [39] y el artículo 'Diagnóstico y Prospectiva de la mecatrónica en México' [40], establecen que se estima conservadoramente que cada año egresan alrededor de 2500 estudiantes de mecatrónica de las más de 150 escuelas en todos los niveles. De los cuales, según datos preliminares indican que ni siquiera el 1% de los egresados ejerce esta profesión en la industria. Una de las principales razones de este fenómeno es la falta de preparación de los egresados en las necesidades empresariales.

La creación de este proyecto tiene como finalidad el desarrollo de una estación automatizada didáctica que, con solamente utilizarla, alguien sin experiencia comprenda el funcionamiento total del equipo, cubriendo la necesidad de formar ingenieros mecatrónicos con habilidades prácticas en programación e integración por PLC. Esto coadyuvaría a que sean contratados por empresas que busquen el perfil de alguien preparado en estas áreas de conocimiento, generando un beneficio económico a ambas partes. De igual manera, se busca motivar a los usuarios a crear, desarrollar y realizar el mantenimiento preventivo y correctivo de máquinas. Lo anterior mencionado se señala debido a que es un hecho que, en la mayoría de las industrias en México, se busca comprar equipo automatizado en el extranjero antes que darles la oportunidad a las empresas locales a desarrollarlas.

## **1.6. Alcances y delimitaciones**

El módulo didáctico automatizado será capaz de asistir a estudiantes de ingeniería en el proceso de aprendizaje de temas relacionados con automatización industrial. Este sistema contará con cilindros neumáticos con el fin de realizar las diferentes acciones del sistema, dado esto se implementarán sensores de diferentes características con el fin de detectar el cumplimiento de cada una de las fases de la estación. La flexibilidad del módulo le permitirá al alumno realizar prácticas de diferentes niveles de complejidad mediante la modificación estructural e informática del mismo. Cabe resaltar, que este proyecto llegará solamente a nivel de simulación.

## **1.7. Cronograma de actividades**

En la siguiente sección se presentará la información de las actividades necesarias para desarrollar el proyecto. Se contarán con 16 semanas para realizar el proyecto y en la Tabla 1.1 se muestra a detalle el tiempo que se va a requerir para realizar cada una de las actividades en listadas.

Tabla 1.1: Cronograma de Actividades del Proyecto

| <b>Cronograma de actividades (semanas)</b> |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |
|--------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Actividades</b>                         | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> | <b>7</b> | <b>8</b> | <b>9</b> | <b>10</b> | <b>11</b> | <b>12</b> | <b>13</b> | <b>14</b> | <b>15</b> | <b>16</b> |
| Búsqueda de información                    | *        | *        |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |
| Escritura del documento                    |          | *        | *        | *        | *        | *        | *        | *        | *        | *         | *         | *         | *         | *         | *         |           |
| Diseño de módulo                           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |
| Generación de planos                       |          |          |          | *        | *        |          |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |
| Diseño de algoritmo de control             |          |          |          |          |          | *        | *        |          |          |           |           |           |           |           |           |           |
| Diseño de <i>HMI</i>                       |          |          |          |          |          |          |          | *        | *        | *         |           |           |           |           |           |           |
| Simulación y análisis                      |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           | *         | *         |           |           |           |           |
| Presentación final                         |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           | *         |           |

# Capítulo 2

## Revisión de Literatura

Los elementos más habituales que incluyen los sistemas mecatrónicos son los siguientes:

- La *fente de energía* proporciona la energía necesaria para impulsar el actuador. En los sistemas industriales, las fuentes de energía más comunes son la energía eléctrica o de fluidos.
- El *convertidor de potencia* suministra (o devuelve) la energía de la fuente de alimentación al actuador de acuerdo con las órdenes del controlador. Algunos ejemplos industriales de convertidores de potencia son inversores eléctricos o válvulas proporcionales hidráulicas.
- El *actuador* es el convertidor de energía que convierte la energía de la fuente de alimentación en energía mecánica.
- La *carga mecánica* es el sistema mecánico que se impulsa.
- El *controlador* es responsable de hacer que todo el sistema siga los puntos de referencia establecidos por un operador del sistema externo. Esto se logra detectando las cantidades críticas y aplicando los algoritmos de control adecuados.

Sin embargo, cuando se diseña un sistema mecatrónico, de los elementos mencionados anteriormente, generalmente el diseñador toma en cuenta principalmente los actuadores, sensores, y controladores que se van a utilizar. Esto se debe a que dependiendo del modelo que se vaya a utilizar, la geometría del mismo suele cambiar. En el caso de los controladores, hay que tomar en cuenta la cantidad de elementos de control que se utilizarán en el diseño para

poder asignarles un espacio. Del mismo modo, el diseñador debe contar con los conocimientos requeridos sobre estos elementos para poder tener un criterio sólido en la selección de los mismos. En esta sección, se dará una introducción a estos elementos.

## 2.1. Sensores

Las estaciones de trabajo, las celdas de trabajo y los centros de trabajo representan conjuntos coordinados de un sistema de producción. Una máquina de producción con varios procesos se considera una estación de trabajo. Una máquina herramienta también se considera una estación de trabajo. Las estaciones de trabajo integradas forman una celda de trabajo. Se pueden agrupar varias estaciones de trabajo complementarias para construir una celda de trabajo. Del mismo modo, las células de trabajo integradas pueden formar un centro de trabajo. Esta estructura es el concepto básico en el modelado de un sistema de fabricación flexible [26].

En la mayoría de los casos los sensores se implementan dentro de las estaciones de trabajo, esto se debe a que son el único medio práctico de operar un sistema de fabricación, mientras que en paralelo se rastrea su desempeño en tiempo real [26]. Los sensores, también denominados transductores, son una parte esencial de cualquier sistema de procesamiento de información que opera en más de un dominio físico. Estos dominios se caracterizan por el tipo de magnitud física que proporciona al portador de la información relevante. Estos dispositivos forman parte de un sistema de medición que convierte la información sobre un mensurando de un dominio a otro, idealmente sin pérdida de información [27].

### 2.1.1. Magnitudes físicas

Dar valores numéricos a las magnitudes físicas y ecuaciones a los principios físicos permite comprender más profundamente la naturaleza que la descripción cualitativa por sí sola. Una magnitud física se define especificando la manera en que se mide o indicando cómo se calcula a partir de otras medidas. Todas las magnitudes físicas pueden expresarse como combinaciones de cuatro magnitudes físicas fundamentales: longitud, masa, tiempo y corriente eléctrica [49].

## Clasificación de magnitudes físicas

Se han realizado varios intentos para establecer un marco coherente sobre magnitudes físicas. Estas se pueden dividir en subgrupos según varios criterios, lo cual conduce a subgrupos con características diferentes [27].

- **Respecto a su comportamiento en el tiempo:** una variable de estado describe una propiedad estática, mientras que una variable de tasa describe una propiedad dinámica.
- **Respecto a su dirección:** si la magnitud tiene dirección es denominada vector, de lo contrario es una escalar.
- **Respecto a su energía:** si la magnitud esta asociada con un fenómeno energético se le denomina variable, de lo contrario es una propiedad o constante.
- **Respecto a la dependencia de la masa o el tamaño:** una magnitud cuyo valor es independiente de las dimensiones o la cantidad de materia se denomina magnitud intensiva, de lo contrario es denominado magnitud extensiva.
- **Respecto a los puntos finales de un elemento agrupado:** un elemento agrupado simboliza una propiedad particular de un componente físico. Se cree que esa propiedad se concentra en ese elemento entre sus dos puntos finales o nodos. El intercambio de energía o información se produce solo a través de estas terminales. Puede dividirse en dos: variable transversal, definida por la diferencia de su valor entre los dos terminales de un elemento agrupado y variable de paso, una variable que tiene el mismo valor en ambos terminales del elemento agrupado
- **Respecto a causa y efecto:** las variables independientes se aplican desde una fuente externa al sistema, mientras que las variables dependientes son respuestas del sistema a las variables de entrada.
- **Respecto a la conjugación de poder:** dentro de un solo dominio de energía, los pares de variables se pueden definir de tal manera que su producto sea potencia, los cuales se denominan variables de potencia conjugada. Los miembros de dicho par se denominan variable de esfuerzo y variable de flujo.

- **Respecto a la conjugación energética:** Otra forma de definir pares de variables se basa en la propiedad de que su producto es igual a energía por unidad de volumen  $J/m^3$ . Algunos de los pares para los dominios principales son: mecánicos de traslación, mecánicos de rotación, eléctricos, magnéticos y térmicos

Si bien existen una gran cantidad de sensores, los campos de aplicación no proporcionan un conjunto restringido de sensores, ya que en cada campo se podrían aplicar diferentes tipos de sensores según el criterio del diseñador [27]. La tabla 2.1 presenta una lista de magnitudes físicas [50]. Ciertamente, la lista no es exhaustiva, pero muestra los muchos posibles mensurandos que comúnmente se encuentran en la industria. Para cada una de estas magnitudes están disponibles uno o más principios de medición.

Tabla 2.1: Lista de magnitudes físicas.

| <b>Mecánicos,solidos</b> | <b>Mecánicos,fluidos</b> | <b>Radiación nuclear</b> | <b>Acústico</b>              |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Aceleración              | Densidad                 | Grado de ionización      | Frecuencia de sonido         |
| Angulo                   | Dirección de flujo       | Absorción de masa        | Intensidad del sonido        |
| Velocidad Angular        | Velocidad de flujo       | Dosis de radiación       | Polarización de sonido       |
| Area                     | Nivel                    | Energía de radiación     | Presión de sonido            |
| Diámetro                 | Presión                  | Radiación de flijo       | Velocidad de sonido          |
| Distancia                | Tasa de flujo            | Tipo de radiación        | Tiempo de vuelo              |
| Elasticidad              | Viscocidad               |                          |                              |
| Expansión                | Volumen                  | <b>Químicos</b>          | <b>Magnéticos,eléctricos</b> |
| Nivel de llenado         |                          | Nubes                    | Capacidad                    |
| Fuerza                   | <b>Térmicos</b>          | Composición              | Carga                        |
| Gradiente                | Entalpía                 | Concentración            | Corriente                    |
| Dureza                   | Entropía                 | Conduct. eléctrica       | Constante dieléctrico        |
| Altura                   | Temperatura              | Humedad                  | F. del c. eléctrico          |
| Largo                    | Capacidad térmica        | Impureza                 | Poder eléctrico              |
| Masa                     | Conductividad térmica    | Grado de ionización      | Resistencia eléctrica        |
| Momento                  | Expansión térmica        | Humedad                  | Frecuencia                   |
| Movimiento               | Radiación térmica        | Peso molar               | Inductividad                 |
| Orientación              |                          | Forma partícula          | F. del c. magnético          |
| Pitch                    | <b>Opticos</b>           | Tamaño particula         | Fase                         |
| Posición                 | Color                    | pH                       | Duración de pulso            |
| Presión                  | Polarización luz         | Polimerización           | Distorsión de señal          |
| Proximidad               | Longitud onda de luz     | Indice de reacción       |                              |
| Rotación                 | Luminancia               | Potencial redox          | <b>Tiempo</b>                |
| Aspereza                 | Intensidad de luz        | Conduct. térmica         | Tiempo                       |
| Forma                    | Reflexión                | Contenido de agua        | Frecuencia                   |
| Tensión                  | Indice de refracción     |                          | Ciclo de trabajo             |
| Torque                   |                          |                          |                              |
| Torsión                  |                          |                          |                              |
| Velocidad                |                          |                          |                              |
| Vibración                |                          |                          |                              |
| Peso                     |                          |                          |                              |

### 2.1.2. Características de los sensores

Las imperfecciones de un sensor normalmente son enlistadas en la hoja de datos que provee el fabricante. Estas especificaciones notifican al usuario sobre las desviaciones que se pueden presentar en el comportamiento ideal del sensor. Desafortunadamente, las hojas de datos suelen carecer de claridad e integridad, lo que ha llevado a que se establezcan acuerdos internacionales

sobre la descripción formal de errores en general [27]. Se puede encontrar en la literatura la Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición (GUM, por sus siglas en inglés) [28] que establece una descripción exhaustiva de los errores de medición y la terminología de errores, junto con un estándar internacional sobre la nomenclatura y terminología de los transductores que establece la Sociedad Internacional de Automatización (ISA, por sus siglas en inglés) [29]. Cabe resaltar, que la ISA trabaja exhaustivamente en desarrollar un marco uniforme para especificar sensores, algunos ejemplos a destacar se encuentran en [30–36].

La mayoría de los sensores muestran diferentes grados de no linealidad, por lo que su linealización en un punto de operación está relacionada con el diseño, modelado y control del sensor [37]. Estas características describen el comportamiento de un sensor y pueden ser clasificadas en cuatro grupos [27]:

- **Características estáticas:** describen el desempeño respecto a cambios lentos.
- **Características dinámicas:** especifican la respuesta del sensor a las variaciones en el tiempo y en el mensurando.
- **Características ambientales:** describen el rendimiento del sensor después o durante la exposición a condiciones externas específicas, por ejemplo: presión, temperatura, vibración y radiación.
- **Características dinámicas:** describen la esperanza de vida del sensor.

En la mayoría de los sistemas de medición, el mensurando cambia tan lentamente que solo es necesario conocer las características estáticas de los sensores. Sin embargo, estas características también influyen en el comportamiento dinámico del sensor, es decir, su comportamiento cuando la cantidad medida cambia con el tiempo. Como resultado, el comportamiento estático y dinámico se estudian por separado. Cabe mencionar, que los conceptos que se utilizarán para describir las características estáticas no son exclusivos de los sensores, si no que son comunes a todos los instrumentos de medida [38], los cuales se enlistan a continuación.

- Sensibilidad
- No linealidad e histéresis

- Resolución
- Presición, exactitud, repetibilidad y reproducibilidad
- Compensación
- Ruido
- Tiempo de respuesta

### Sensibilidad

Se define como la proporción en el cambio del valor de salida y el cambio en el valor de entrada que causa que la salida cambie [27]. Matemáticamente, para un sensor cuya entrada  $y$  se relaciona con la entrada  $x$  mediante la ecuación  $y = f(x)$ , la sensibilidad  $S(x_a)$ , en el punto  $x_a$  se define en la ecuación 2.1.

$$S(x_a) = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=x_a} \quad (2.1)$$

Se deseable que los sensores tengan una sensibilidad alta y, si es posible, constante. Para un sensor con respuesta  $y = kx + b$  la sensibilidad es  $S = k$  para todo el rango de valores de  $x$  donde se aplica. Para un sensor con respuesta  $y = k^2x + b$  la sensibilidad es  $S = 2kx$  y cambia de un punto a otro en el rango de medición [38].

Normalmente, los sensores son sensibles a los cambios en magnitudes distintas de la magnitud de entrada prevista, como la temperatura ambiente o la tensión de alimentación. Estas sensibilidades no deseadas también deben especificarse para una interpretación adecuada del resultado de la medición. Para tener una mejor idea del efecto de tales sensibilidades no deseadas, a menudo se relacionan con la sensibilidad de la magnitud de medición en sí [27].

### No linealidad e histéresis

La ecuación de transferencia de un sensor con una ligera no linealidad puede aproximarse mediante una línea recta con el fin de especificar su sensibilidad con un solo número. La no linealidad no debe confundirse con la precisión, ya que este indica qué tan cerca está un valor

medido de su valor real, pero no qué tan directa es la función de transferencia [37]. Se debe informar al usuario sobre la desviación de la transferencia real; esto se especifica mediante el error de no linealidad [27]. La linealidad describe la proximidad entre la curva de calibración y una línea recta especificada. Dependiendo de qué línea recta se considere, se aplican varias definiciones [38]:

- **Linealidad independiente:** La línea recta se define por el criterio de mínimos cuadrados. Con este sistema, el error positivo máximo y el error negativo mínimo son iguales. Este es el método que generalmente da la mejor calidad.
- **Linealidad de base cero:** La línea recta también se define por el criterio de mínimos cuadrados pero con la restricción adicional de pasar por cero.
- **Linealidad basada en terminales:** La línea recta se define por la salida correspondiente a la entrada más baja y la salida teórica cuando se aplica la entrada más alta, es decir, una línea recta entre el 0 % y el 100 % de los puntos de escala completa teóricos.
- **Linealidad de los puntos finales:** La línea recta se define por la salida real cuando la entrada es el mínimo del rango de medición y la salida cuando la entrada es el máximo. La línea coincide con la línea terminal (teórica) después de la calibración del cero y la escala.
- **Linealidad teórica:** La línea recta está definida por las predicciones teóricas al diseñar el sensor.

Un sensor puede producir diferentes salidas cuando mide la misma magnitud física dependiendo de la 'dirección' en la que se ha aproximado al valor. La histéresis se refiere a la diferencia entre dos valores de salida que corresponden a la misma entrada, dependiendo de la dirección, ya sea creciente o decreciente, de los sucesivos valores de entrada [38]. Los errores de histéresis suelen ser ocasionados debido a la fricción, la estructura del sensor, las propiedades del material del sensor o los cambios de temperatura y humedad [37].

## Resolución

Los principales factores que influyen la linealidad de un sensor son la resolución, umbral e histéresis. La resolución indica el incremento más pequeño detectable del mensurando de entra-

da [27]. Cuando el mensurando varía continuamente, la salida del sensor puede mostrar pasos discontinuos. Cuando el incremento de entrada es de cero, entonces se denomina umbral. Cuando la señal de entrada puede mostrar cambios rápidos, la suma de todas las fuentes de ruido y señales no deseadas dentro de un sistema de medición del sensor determina la resolución [38].

La resolución de un sensor debe ser superior a la precisión requerida en la medición. Por ejemplo, si una medición requiere una precisión de  $0,02 \mu\text{m}$ , la resolución del sensor debe ser mejor que  $0.02$ . Los factores que afectan la resolución varían de un sensor a otro. Para la mayoría de los sensores capacitivos, el principal factor que afecta es el ruido eléctrico [37].

### **Presición, exactitud, repetibilidad y reproducibilidad**

La precisión es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento de medición de dar la misma lectura cuando mide repetidamente el mismo mensurando bajo las mismas condiciones prescritas, tales como ambientales y físicas, sin consideración por la coincidencia o discrepancia entre el resultado y el valor real. Esta característica implica una concordancia entre lecturas sucesivas y un elevado número de cifras significativas en el resultado [38].

Precisión no es lo mismo que exactitud. En realidad, el término precisión no debe utilizarse en ningún caso cuando se trata de describir un sensor para evitar confusiones. La exactitud refleja la proximidad de la concordancia entre el resultado de la medición real y un valor real del mensurando. Regularmente, los fabricantes de sensores especifican el rendimiento del sensor en términos de exactitud [27]. Muchos factores pueden afectar la exactitud de un sensor, incluyendo la fluctuación de temperatura, linealidad, histéresis, repetibilidad, estabilidad, compensación cero, error de conversión A / D (analógico a digital) y resolución de pantalla [37].

La repetibilidad es la cercanía de la concordancia entre los resultados sucesivos obtenidos con el mismo método en las mismas condiciones y en un corto intervalo de tiempo. Cuantitativamente, la repetibilidad es el valor mínimo que excede, sucesivas lecturas obtenidas bajo las condiciones especificadas. Si no se indica, se supone que el nivel de probabilidad es del 95 % [38]. Esta característica es causada por la varianza que tenga el dispositivo de medición.

Para valorar el grado de repetibilidad de una determinada medición, el usuario debe medir el mensurando al menos dos veces. evidentemente, cada medición debe realizarse sin recordar ni comprobar cual era el valor obtenido en las mediciones anteriores.

La reproducibilidad también está relacionada con el grado de coincidencia entre mediciones sucesivas en el mismo mensurando con un método dado, en este caso con un conjunto de mediciones a largo plazo o con mediciones realizadas por diferentes personas, instrumentos o laboratorios. Cuantitativamente, la reproducibilidad es el valor mínimo que excede el valor absoluto de la diferencia entre dos resultados de medición únicos obtenidos en las condiciones antes mencionadas. Si el fabricante no lo indica, se supone que el nivel de probabilidad es del 95 % [38].

### **Compensación**

La compensación del sensor se utiliza para ajustar el rango de un sensor si el rango de corriente no es aceptable. También se puede utilizar para contrarrestar las irregularidades en la fabricación no estándar. La mayoría de los sensores están diseñados de manera que la salida sea cero en la entrada cero. Si la característica de transferencia no se cruza con el origen (0,0), se dice que el sistema tiene una compensación. Este se expresa en términos del mensurando de entrada o salida. Una vez ajustado a cero, la compensación puede cambiar debido a variaciones de temperatura, cambios en la tensión de alimentación o efectos del envejecimiento.

### **Ruido**

Todos los sensores generan ruido además de sus señales de salida. El ruido del sensor se puede definir como cualquier desviación o fluctuación de un valor esperado. La medida en que el ruido se vuelve significativo en un proceso de detección o medición depende de la amplitud relativa de la señal de interés con respecto al valor del ruido no deseado que es denominado relación señal-ruido (SNR. por sus siglas en inglés). Si el valor del ruido es pequeño en comparación con el nivel de la señal, entonces la SNR es grande y el ruido deja de ser importante. En el diseño de sensores, siempre se intenta maximizar la SNR [37].

## Tiempo de respuesta

El tiempo de respuesta está asociado con la velocidad de cambio en la salida en un cambio escalonado del mensurando. La especificación del tiempo de respuesta siempre debe ir acompañada de una indicación del paso de entrada (por ejemplo, FS escala completa) y el rango de salida para el que se define el tiempo de respuesta, por ejemplo, 10-90 %. La fluencia y las oscilaciones pueden hacer que la especificación del tiempo de respuesta sea menos significativa o al menos engañosa [38].

### 2.1.3. Clasificación de sensores

Existe una gran variedad de sensores disponibles que son correspondientes para las diferentes magnitudes físicas. Para poder analizarlos correctamente, es de conveniencia clasificar los sensores según los siguientes criterios [27, 38].

- **Según su necesidad de una fuente de poder:** Estos se clasifican en moduladores y autogeneradores, cabe resaltar que también son llamados pasivos y activos respectivamente. Los sensores moduladores, la mayor parte de la potencia de la señal de salida proviene de una fuente de alimentación externa. Por otro lado, en los sensores autogeneradores, la potencia de salida proviene de la entrada.
- **Según su señal de salida:** Estos se clasifican en analógicos y digitales. En los sensores analógicos la información suele obtenerse de la amplitud, aunque los sensores con salida en el dominio del tiempo suelen considerarse analógicos. La salida de los sensores digitales tiene forma de pasos o estados discretos. Los sensores digitales no requieren un convertidor de señal digital a analógica y su salida se transmite con mayor facilidad que la de los sensores analógicos. De igual manera, las salidas digitales son superiores en la repetibilidad, confiabilidad y, a menudo, en la precisión. El lado negativo de los sensores digitales es que no tienen la capacidad de medir todas las magnitudes físicas existentes.
- **Según su modo de operación:** Los sensores se clasifican de acuerdo a su función en un modo de deflexión o nulo. En los sensores de deflexión la magnitud medida produce un efecto físico que genera en alguna parte del instrumento un efecto similar pero opuesto que se relaciona con alguna variable útil. Por ejemplo, un dinamómetro es un sensor

donde la fuerza que se va a medir desvía un resorte hasta el punto en que la fuerza que ejerce, proporcional a su deformación, equilibra la fuerza aplicada. Por otro lado, los sensores nulos intentan contrarestar el desvío desde el punto nulo aplicando un efecto conocido que se opone al producido por la cantidad que se mide, por lo que hay un detector de desequilibrio y medios para restablecer el equilibrio. En una balanza, por ejemplo, la colocación de una masa en un plato produce un desequilibrio indicado por un puntero. El usuario debe colocar una o más pesas calibradas en el otro plato hasta que se alcance un equilibrio, que se puede observar desde la posición del puntero.

- **Según su relación entrada-salida:** Los sensores se pueden clasificar en orden cero, primero, segundo o superior. El orden está relacionado con el número de elementos de almacenamiento de energía independientes presentes en el sensor, el cual afecta su precisión y velocidad. Esta clasificación es importante cuando el sensor forma parte de un sistema de control de circuito cerrado, esto se debe a que un retraso excesivo puede llegar a provocar una oscilación en la medición.

#### 2.1.4. Tipos de sensores

Para automatizar con éxito un proceso, es necesario obtener información sobre su estado actual en tiempo real. Los sensores son la parte del sistema de control responsable de recopilar y preparar los datos del estado del proceso y pasarlos a un procesador, para eso se requiere de un amplio conocimiento sobre los tipos de sensores que existen en la industria. Entre los tipos de sensores más comunes utilizados en la industria se encuentran los siguientes:

1. Fotoeléctricos
2. Resistivos
3. Capacitivos
4. Inductivos
5. Magnéticos
6. Ultrasónicos

7. *Reed switches*

8. Fibras ópticas

### Fotoeléctricos

El principio de funcionamiento de los sensores fotoeléctricos se basa en utilizar haces de luz para detectar la presencia o ausencia de un objeto. Absolutamente todos los sensores fotoeléctricos constan de un sensor, una unidad de control y un dispositivo de salida. Cabe resaltar, que es posible agregar un módulo lógico u otros accesorios al control básico para agregar versatilidad. Estos sensores constan de una fuente y un detector, los cuales, la fuente es un diodo emisor de luz que emite un potente haz de luz en el espectro de luz infrarroja o visible y el detector es típicamente un fotodiodo que detecta la presencia o ausencia de luz tal y como se muestra en la figura 2.1. El amplificador de detección que utilizan estos sensores están diseñados para que respondan a la luz emitida por la fuente. Una característica importante de estos sensores es que la fuente y el detector pueden estar separados o pueden montarse en el mismo cabezal, todo depende de la serie del sensor y la aplicación [26].

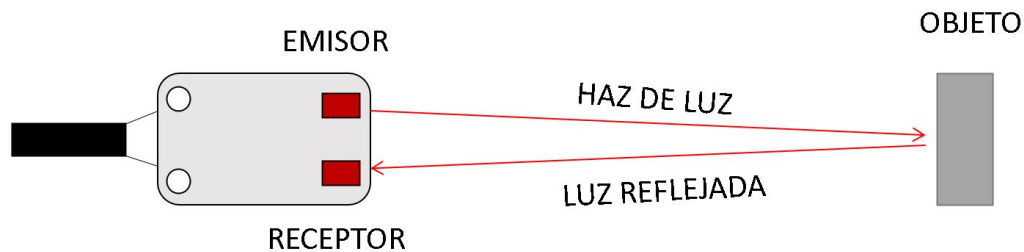


Figura 2.1: Funcionamiento de los sensores fotoeléctricos.

La unidad de control de los sensores fotoeléctricos tienen la función de modular la luz enviada por la fuente y demodular la recibida por el detector, lo cual asegura que el control fotoeléctrico responde solamente a su propia fuente de luz. Cabe resaltar, que la unidad de control también controla el dispositivo de salida en controles fotoeléctricos autónomos. La unidad de control y el sensor están integrados en una unidad integral [4].

## Resistivos

El principio de funcionamiento de estos sensores están basados en la variación de la resistencia eléctrica de un dispositivo. Este tipo de sensores son de uso común, lo cual se debe a que muchas magnitudes físicas afectan la resistencia eléctrica de un material, algunos ejemplos se ilustran en la figura ???. Dado esto, los sensores resistivos se utilizan para resolver distintos problemas de medición [38]. Los sensores resistivos cuentan con diversas características deseables, tales como: confiabilidad, resolución ajustable, construcción simple y facilidad de mantenimiento, los cuales los han convertido en la opción preferida en el diseño y la aplicación de sensores. Según sus principios de detección, los sensores resistivos se clasifican en 7 grupos [37]:

- *Sensores potenciométricos*: surge un cambio de resistencia debido a la alteración de la posición lineal o angular del sensor.
- *Sensores de temperatura resistivos*: se produce un cambio de resistencia causado por la variación de temperatura, a este fenómeno se le denomina 'efecto termoresistivo'.
- *Sensores fotorresistivos*: existe una disminución en la resistencia del sensor cuando una luz incide en un material fotoconductor, a este fenómeno se le conoce como 'efecto fotorresistivo'.
- *Sensores piezorresistivos*: se produce un cambio en la resistencia del sensor cuando se aplica una fuerza en el conductor piezorresistivo, a este fenómeno se le conoce como 'efecto piezorresistivo'.
- *Sensores magnetorresistivos*: se produce un cambio en la resistencia del sensor en la presencia de un campo magnético externo, a este fenómeno se le conoce como 'efecto magnetorresistivo'.
- *Sensores quimiorresistivos*: se produce un cambio de conductividad en un material o solución debido a reacciones químicas que alteran el número de electrones o la concentración de iones.
- *Sensores biorresistivos*: se produce un cambio de biorresistencia en proteínas o células que se induce a través de interacciones estructurales y biológicas.

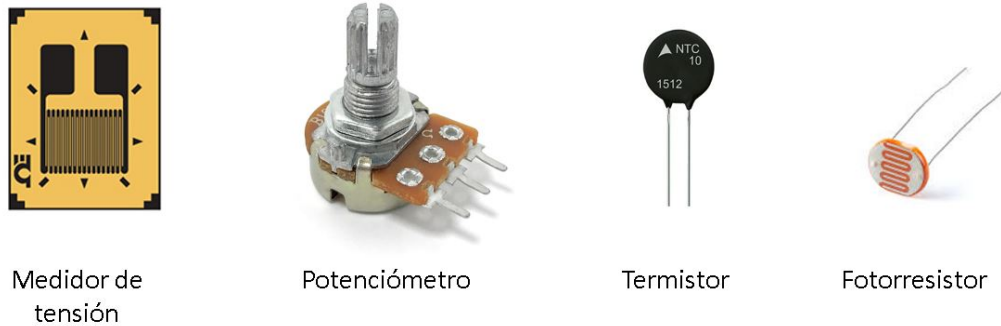


Figura 2.2: Ejemplos de sensores resistivos.

## Capacitivos

Los sensores capacitivos se basan en cambios en la capacitancia en respuesta a variaciones físicas [45], su funcionamiento interno se ilustra en la figura 2.3. Estos sensores son los más precisos de todos los sensores eléctricos tales como los resistivos e inductivos, y son conocidos por su sensibilidad extremadamente alta, alta resolución, ancho de banda amplio, robustez, estabilidad y durabilidad a largo plazo, carácter libre de deriva, estructuras simples, bajo costo y características de detección sin contacto [37].

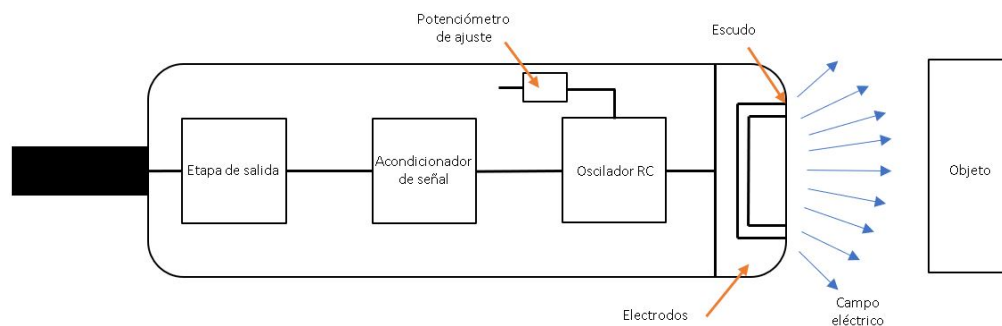


Figura 2.3: Principio de funcionamiento de los sensores de proximidad capacitivos.

La distancia de detección para los sensores capacitivos depende del diámetro de la placa, así como el tamaño de la bobina es para los sensores inductivos. Los sensores capacitivos miden una brecha dieléctrica, por consiguiente, es deseable compensar las condiciones objetivo y de aplicación con un ajuste de sensibilidad para el rango de detección. La mayoría de los interruptores de proximidad capacitivos están equipados con un potenciómetro de ajuste de sensibilidad [26]. Usando construcciones especiales, el rango de medición de los sensores capa-

citivos se puede ampliar casi sin límite mientras se mantiene la precisión intrínseca. Además, debido a la naturaleza analógica del principio capacitivo, los sensores tienen una resolución excelente [27].

### Inductivos

Los sensores inductivos fueron diseñados en base al principio de funcionamiento y características de un inductor. Un inductor es un componente electromagnético que relaciona la interacción entre campos eléctricos y magnéticos. Se pueden emplear muchos principios electromagnéticos para diseñar sensores inductivos, magnéticos o electromagnéticos. Estos sensores se utilizan principalmente para medir estos campos u otras magnitudes físicas, como desplazamiento y presión, que se transforman en una respuesta eléctrica o magnética. Los sensores inductivos no requieren de contacto físico para realizar una detección; por lo tanto, son denominados 'sensores sin contacto' y son particularmente útiles para aplicaciones cuyo acceso presenta desafíos [37].

El rango de detección de un sensor de proximidad inductivo se refiere a la distancia entre la cara del sensor que realiza la detección y el objetivo. También depende de la forma del campo de detección generado a través de la bobina y el núcleo. Cabe resaltar, que existen factores mecánicos y ambientales que afectan el rango de detección, como los que se muestran en la tabla 2.2 [26].

Tabla 2.2: Factores que afectan el funcionamiento de un sensor inductivo.

| Factores mecánicos       | Factores ambientales                |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Tamaño del núcleo        | Temperatura del ambiente            |
| Recubrimiento del núcleo | Condiciones eléctricas circundantes |
| Material del objetivo    | Condiciones mecánicas circundantes  |
| Tamaño del objetivo      | Variación entre dispositivos        |
|                          | Forma del objetivo                  |

### Magnéticos

Un sensor magnético es un dispositivo capaz de detectar un campo magnético y extraer información de él. En la mayoría de las aplicaciones prácticas, la información está relacionada

con la inducción magnética a lo largo de un eje y el sensor la transduce en una señal eléctrica. Por lo tanto, un sensor magnético es un transductor que convierte un campo magnético en una señal eléctrica correspondiente [46]. Existe una gran cantidad de principios físicos utilizados para realizar sensores magnéticos, los cuales incluyen: inducción, efectos galvanomagnéticos, precesión nuclear, interferencia cuántica superconductora, magnetostricción y efectos magneto-ópticos [47, 48].

Lo que finalmente decidirá la viabilidad comercial de un sensor magnético en particular es su rendimiento, así como su compatibilidad con miniaturización y circuitos microelectrónicos [46]. Un aspecto importante de los sensores magnéticos es que poseen un sensado sin contacto. No existe conexión mecánica o vinculación entre los miembros estacionarios y los miembros móviles del sensor. Que el sensor sea sin contacto implica que la vida útil del elemento de sensado no se limita a un número finito de ciclos por el desgaste inducido por fricción. Esto es importante en algunas maquinarias industriales y en muchas aplicaciones que requieren alta confiabilidad [45].

### **Ultrasónicos**

El ultrasonido es una radiación mecánica con una frecuencia por encima del rango de audición humana (aproximadamente 20 kHz). Como ocurre con cualquier radiación, cuando el ultrasonido incide en un objeto, una parte se refleja, otra se transmite y otra se absorbe. Además, cuando la fuente de radiación se mueve en relación al reflector, hay un cambio en la frecuencia recibida, a esto se le denomina 'efecto Doppler'. Todas estas propiedades sobre la interacción del objeto de radiación se han aplicado a la medición de diferentes magnitudes físicas a través de ultrasonidos [38].

El poder de penetración de los ultrasonidos permite aplicaciones no invasivas; es decir, no es necesario instalar hardware donde se produzcan los cambios a detectar. Las mediciones no invasivas son de interés en entornos donde se pueda dañar el sensor, tales como: explosivos, radiactivos, aplicaciones médicas y para prevenir la contaminación del medio donde se realizan las mediciones. Por lo tanto, los sensores no invasivos son generalmente más fáciles

de instalar y mantener que los sensores invasivos [38]. El funcionamiento de estos sensores se puede basar en diferentes principios, tales como: mecánicos, electromagnéticos, piezoeléctricos, electrostáticos y magnetorestrictivos [45].

### Reed switches

Un *reed switch* se construye de manera muy similar al interruptor de luz ordinario que se utiliza en el hogar u oficina, ya que tiene las mismas características ON / OFF. Estos sensores generalmente tienen un brazo mecánico sensible a la presión, que cuando es presionado, el circuito del interruptor se energiza [44]. Los *reed switch* mecánicos son los más antiguos y simples de todos los dispositivos de detección de presencia o posición. Esta simplicidad contribuye en general a la ventaja económica que los caracteriza. Sin embargo, pueden proporcionar las capacidades de control y la versatilidad exigidas en el entorno de fabricación sin errores que actualmente existe [26].

No solamente existen los *reed switch* mecánicos, también es común que un objeto posea un imán adjunto que hace que el contacto de sensor se eleve y se cierre cuando el objeto pasa por encima del brazo. Los *reed switch* pueden estar normalmente abiertos (NO, por sus siglas en inglés) o normalmente cerrados (NC, por sus siglas en inglés) y pueden tener varios polos, tal y como se muestra en la figura 2.4. Un interruptor normalmente abierto tiene continuidad cuando se aplica presión y se hace un contacto, mientras que un interruptor normalmente cerrado se abre cuando se aplica presión y se separa un contacto. Un interruptor unipolar permite que un circuito se abra o se cierre al entrar en contacto con el interruptor, mientras que un interruptor multipolar permite que se abran o cierren varios circuitos [44].

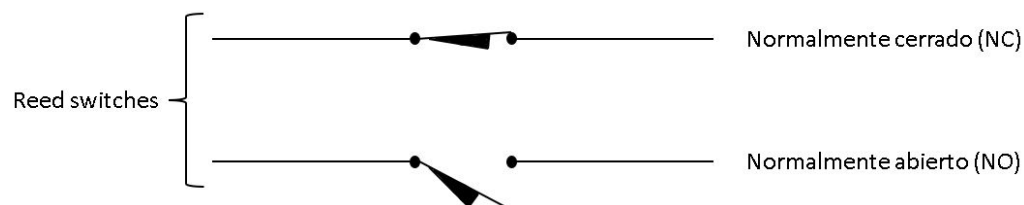


Figura 2.4: Reed switch normalmente abierto y cerrado.

Los *reed switches* son utilizados en distintos sistemas comerciales, tales como: automóviles en el monitoreo de luces rotas, órganos electrónicos en los contactos de reproducción, dispo-

sitivos de telecomunicaciones y equipos de prueba y medición. En los sistemas mecatrónicos actúan como detectores de fin de carrera en actuadores neumáticos e hidráulicos, sensores táctiles y otros dispositivos de seguridad [27].

### **Fibras ópticas**

La tecnología de fibras ópticas se encuentra actualmente en un estado maduro, ya que existen diferentes aplicaciones que ya utilizan sensores comerciales de fibra óptica como estándar [43]. El éxito de esta tecnología se basa en la flexibilidad intrínseca, el bajo peso, la compactidad, la inmunidad a la interferencia electromagnética, la alta sensibilidad, el ancho de banda, el funcionamiento pasivo y el alto rango dinámico, asociados con las capacidades de monitoreo remoto y multiplexación, que permiten que estos sensores de fibra óptica tengan éxito en situaciones de medición difíciles donde los sensores convencionales fallan [41, 43]. Además, debido a que no contienen componentes electrónicos, pueden funcionar a temperaturas altas (hasta 400 °F) y en áreas de alta vibración. Estos sensores están limitados por las distancias de detección tan cortas, normalmente son de 80 mm en el modo de proximidad y 400 mm en el modo de barrera. Además, debido a su pequeña área de detección, las fibras ópticas pueden tener una falsa detección por una pequeña gota de agua o suciedad sobre el área de detección [26].

El funcionamiento de las fibras ópticas consta de una fuente de luz, que puede ser led o láser, una fibra óptica y un fotodetector. Los sensores de fibra óptica operan modificando una o más propiedades de la luz que pasa a través del sensor cuando cambia el parámetro a medir [43]. Existen dos tipos de fibra óptica: la individual y la bifurcada, tal y como se muestran en la figura 2.5. Los conjuntos de fibra óptica individuales guían la luz desde un emisor a una ubicación de detección, o a un receptor desde una ubicación de detección. Las fibras bifurcadas usan la mitad de su área de fibra para transmitir luz y la otra mitad para recibir luz [26].

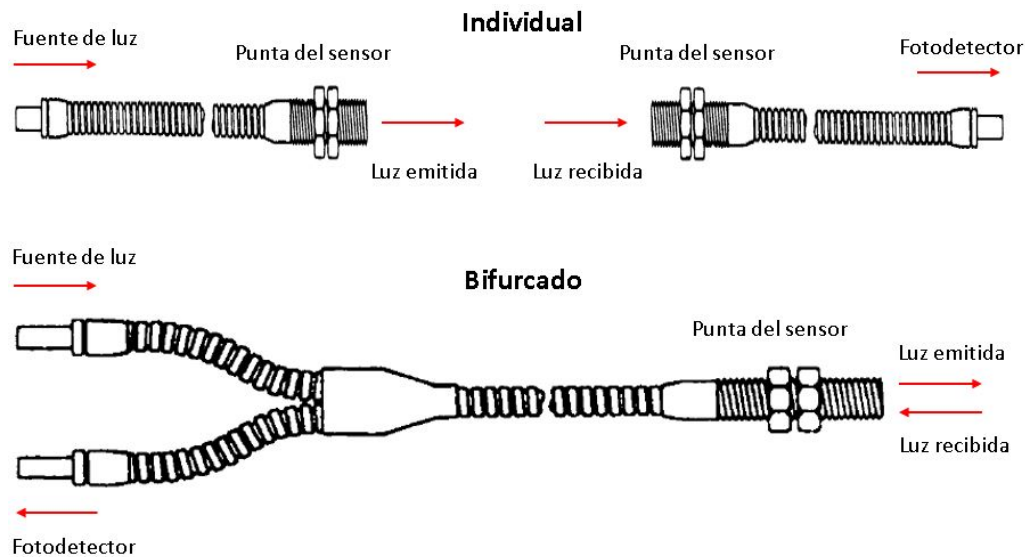


Figura 2.5: Fibra óptica individual y bifurcada.

## 2.2. Actuadores

Al igual que los sensores, los actuadores son denominados transductores, siendo los sensores transductores de entrada y los actuadores transductores de salida [27]. Un actuador puede definirse como un convertidor que transforma la energía de una fuente externa en energía mecánica de forma controlable [51, 52]. En otras palabras, son básicamente el músculo detrás de un sistema mecatrónico que recibe un comando de control, generalmente en forma de una señal eléctrica, y produce un cambio en el sistema físico al generar fuerza, movimiento, calor, flujo, etc [53]. Las magnitudes de entrada del actuador dependen del tipo de energía utilizada y se pueden elegir entre todas las magnitudes involucradas en la conversión de energía desde la fuente de energía hasta las magnitudes mecánicas de salida [54].

Normalmente, los actuadores se utilizan en conjunto con un mecanismo de acoplamiento y una fuente de alimentación. El mecanismo de acoplamiento actúa como interfaz entre el actuador y el sistema físico. Entre los mecanismos típicos se incluyen: piñón y cremallera, transmisión por engranes, transmisión por bandas, tornillo y tuerca de avance, pistón y herramientas personalizadas [53]. La unidad de potencia proporciona alimentación, en la mayoría de los casos se requiere energía auxiliar eléctrica, hidráulica o neumática [55], pero existen casos

no convencionales en los que se utilizan otras fuentes de energía tales como: energía térmica, química, magnética, entre otros.

### 2.2.1. Clasificación de actuadores

Los actuadores se pueden clasificar según el tipo de alimentación, pueden ser eléctricos, de fluido o no convencionales, tal como se muestra en la figura 2.6. El esquema aunque no engloba todos los tipos de actuadores que existen, si enumeran todos los básicos. Son esencialmente de tipo electromecánico, hidráulico y neumático. Las nuevas generaciones de actuadores incluyen actuadores de material inteligente, microactuadores, nanoactuadores, entre otros [53].

| Eléctricos                                                                                                                                              | De fluido                                       | No convencionales                                                                                                                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Actuadores eléctricos<br>Motores eléctricos<br>Actuadores de solenoide<br>Actuadores de bobina móvil<br>Actuadores electromagnéticos<br>Motores a pasos | Actuadores neumáticos<br>Actuadores hidráulicos | Actuadores piezoeléctricos<br>Actuadores de aleación con memoria de forma térmica<br>Actuadores electroestáticos<br>Actuadores magnetostrictivos<br>Actuadores de expansión térmica<br>Actuadores piezocerámicos<br>Actuadores electroquímicos<br>Microactuadores |

Figura 2.6: Clasificación de actuadores según su alimentación.

#### Actuadores electromecánicos

Los actuadores electromecánicos transforman la energía eléctrica en mecánica. Poseen una alta velocidad de respuesta, tienen un mantenimiento sencillo, son fáciles de controlar, es de bajo costo y es una fuente de energía limpia, aunque es susceptible a fallas mecánicas debido a las partes móviles [56]. Los motores son el principal medio para convertir la energía eléctrica en energía mecánica en la industria. En términos generales, se pueden clasificar como motores de DC, motores de AC y motores paso a paso. Los motores de DC funcionan con voltaje de

DC y al variar el voltaje se puede controlar fácilmente su velocidad. Aunque son más costosos, necesitan una fuente de alimentación de DC y requieren más mantenimiento en comparación con los motores de AC [53]. A continuación, se explicará brevemente en que consiste cada tipo de actuador electromecánico:

- **Motores de DC:** Para motores de DC con excitación permanente y conmutación mecánica, el estator estará formado por imanes permanentes mientras que el rotor estará formado por un devanado conectado a un conmutador. Estos motores suelen tener una tensión nominal inferior a 42V y, para aplicaciones alimentadas por batería, su uso está muy extendido debido a su alta eficiencia. Estas áreas de aplicación incluyen vehículos de carretera, electrodomésticos, herramientas de jardín, equipos médicos y de laboratorio, así como equipos de oficina [55].

Si los imanes permanentes se reemplazan por un devanado de estator, el motor resultante será un motor de CC excitado eléctricamente. Para los motores devanados en serie, el devanado del estator y el devanado del inducido están conectados en serie. La velocidad de rotación cae desproporcionadamente al par de carga, pero, por otro lado, el par de arranque puede ser de dos a seis veces mayor que el par nominal. Dado que los motores bobinados en serie también pueden alimentarse con corriente alterna, también se denominan motores universales. Sin embargo, su eficiencia es mayor si se alimentan con corriente continua. Las características clave de los motores de CC conmutados mecánicamente se muestran en la tabla 2.3 [55].

Tabla 2.3: Características de los motores de DC.

| Ventajas                            | Desventajas                                                             |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Buenas características de respuesta | Desgaste de conmutador y escobillas                                     |
| Son compactos y ligeros             | La dinámica y el torque de parada están restringidos por el conmutador; |
| Buen comportamiento dinámico        | Mala descarga de calor                                                  |
| Alto grado de sincronismo           |                                                                         |
| Alto rango de velocidad             |                                                                         |

- **Motores de AC:** Estos son motores que funcionan con corriente alterna y se utilizan ampliamente en la industria. Poseen alta fuente de alimentación y son más fáciles

de mantener [56]. Como estos motores pueden construirse con altas velocidades (hasta 40.000 rpm), su relación potencia / peso es muy favorable. Además, la velocidad puede llegar a variar en un rango más amplio y más fácilmente que cualquier otro tipo de motor en comparación de costos [57].

Debido a la alta velocidad de rotación máxima, estos motores pueden diseñarse de manera que ofrezcan una buena relación potencia-peso. El control de velocidad para motores universales es menos complicado y permite un rango más amplio de velocidades de rotación que cualquier otro tipo de motor eléctrico. Esto hace que el motor universal sea la opción predominante para electrodomésticos y máquinas herramientas. Las características clave de los motores de AC conmutados mecánicamente se muestran en la tabla 2.4 [55].

Tabla 2.4: Características de los motores de AC.

| Ventajas                            | Desventajas                         |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Buenas características de respuesta | Desgaste de conmutador y escobillas |
| Alta relación potencia - peso       | Mala descarga de calor              |
| Alto rango de velocidad             |                                     |
| Alta velocidad máxima               |                                     |

- **Motores paso a paso:** Estos son motores que proporcionan una forma de movimiento exacta de desplazamiento angular discreto (ángulos de paso) con error no acumulable. Cada paso angular es accionado por un pulso eléctrico discreto. Se utilizan ampliamente en sistemas de control de bucle abierto [56]. Uno de los motores paso a paso más comunes son los servomotores.

El extremo inferior del rango de potencia de los servomotores permite el uso de servomotores como pequeños actuadores. Estos servomotores se utilizan para tareas de posicionamiento con un marco de tiempo y precisión específicos. Muy a menudo, varios motores tienen que funcionar con un alto grado de sincronismo. Estos requisitos son típicos de los accionamientos de máquinas herramienta, robots y accionamientos de válvulas y trampillas. Por lo tanto, se imponen requisitos restrictivos sobre la dinámica, la precisión de posicionamiento, el torque máximo, el grado de sincronismo y la eficiencia,

por mencionar algunos. En el rango de potencia más bajo, los servomotores eléctricos han prevalecido frente a los actuadores hidráulicos y neumáticos. Las características que hacen superior a un servomotor eléctrico ante los de fluido se muestran en la tabla 2.5 [55].

Tabla 2.5: Diferencias entre servomotores eléctricos y de fluido.

| Servoaccionamiento por fluido  | Servoaccionamiento eléctrico                                                            |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Alta densidad de energía       | Buen comportamiento de control                                                          |
| Menor relación potencia - peso | Buena precisión                                                                         |
| Compactos                      | Buena eficiencia                                                                        |
| Aceleración rápida             | Fácil diagnóstico y mantenimiento                                                       |
| Barato                         | Flexible para diferentes aplicaciones                                                   |
| Movimiento lineal sencillo     | La energía eléctrica se utiliza para alimentar los sensores, actuadores y controladores |
| Robusto                        |                                                                                         |

### Actuadores de fluidos

Los actuadores de fluidos utilizan la potencia del flujo para proporcionar trabajo mecánico; la diferencia entre las presiones en dos cámaras diferentes da como resultado una presión relativa que produce una fuerza en una superficie dada [54]. En estos actuadores, la potencia de un flujo de líquido o gas se ajusta mediante dispositivos específicos. Estos dispositivos están controlados por una señal de entrada eléctrica y transforman la potencia aplicada en una variable mecánica específica, como carrera (ángulo de rotación), velocidad (velocidad de rotación) o fuerza (torque) de un movimiento longitudinal o rotatorio [57].

Los actuadores de fluidos empleados en la industria se clasifican principalmente según el estado del fluido empleado: los actuadores hidráulicos emplean un líquido incompresible (generalmente aceite), mientras que los actuadores neumáticos emplean un gas compresible (aire) [54].

- **Actuadores neumáticos:** La actuación neumática se usa ampliamente en la industria de fabricación principalmente en el campo del ensamblaje automatizado, incluida la operación de efectores finales de robots y plantillas. La energía neumática generalmente utiliza aire presurizado como medio de transferencia de energía. La principal ventaja de

la potencia neumática radica en la simplicidad de los componentes utilizados tanto para la modulación neumática de potencia como para los dispositivos de transferencia de energía, especialmente en el caso de actuadores de movimiento lineal [58].

Estos actuadores se caracterizan por su bajo peso, tamaño compacto, disponibilidad de bajo costo, bajo mantenimiento, capacidad para ser utilizado a temperaturas extremas y capacidad de baja potencia [59]. Además, los sistemas neumáticos son inmunes a las interferencias causadas por campos eléctricos y magnéticos, así como a la radiación. En la tabla 2.6 se muestran otras ventajas y desventajas de utilizar actuadores neumáticos.

Tabla 2.6: Ventajas y desventajas de los actuadores neumáticos.

| Ventajas                          | Desventajas                                           |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Buena capacidad de trabajo        | Se requiere acondicionar con aire comprimido          |
| Buena relación precio - desempeño | Algunos son de dimensiones grandes                    |
| Buena relación potencia - peso    | La fricción y la compresibilidad complican el control |
| Alta fiabilidad                   | Presición de posicionamiento limitado                 |
| Buena seguridad operativa         |                                                       |
| Solo una linea de alimentación    |                                                       |

La ventaja más importante del aire comprimido es que está disponible en casi todas las plantas de la industria. Esta característica, y las mencionadas en la tabla 2.6 hacen que los actuadores neumáticos sean competitivos en una amplia gama de aplicaciones en el control de movimiento para el manejo de materiales y piezas, máquinas emparadoras, máquinas herramientas, robótica, procesamiento de alimentos e industria de procesos [60]. La decisión final sobre el mejor tipo y configuración de diseño para el actuador neumático se puede tomar solo en relación con los requisitos de una aplicación en particular [61].

- **Actuadores hidráulicos:** Los principios básicos de funcionamiento de la potencia de fluido hidráulico son bastante similares a los de los sistemas de potencia de fluido neumático. Sin embargo, la diferencia entre el aire o gas que se utiliza en los sistemas neumáticos al aceite que generalmente se utiliza en la hidráulica, da como resultado características de

rendimiento bastante diferentes. Principalmente, el uso de líquidos permite alcanzar presiones operativas muy elevadas, lo que significa que los actuadores hidráulicos pueden dar una salida de potencia muy alta. De hecho, la aplicación principal de la energía hidráulica tiende a ocurrir donde es necesario aplicar grandes fuerzas y momentos de torsión [58].

Los actuadores hidráulicos se han utilizado durante mucho tiempo en aplicaciones aeronáuticas por su fiabilidad y rendimiento durante una gran cantidad de ciclos. Sin embargo, su tamaño y peso limitan su integración en aplicaciones como palas de helicópteros inteligentes [62]. otras de las principales ventajas y desventajas al utilizar actuadores hidráulicos se enlistan en la tabla 2.7 [54].

Tabla 2.7: Ventajas y desventajas de los actuadores hidráulicos.

| <b>Ventajas</b>                                                                                              | <b>Desventajas</b>                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Alta fuerza de accionamiento                                                                                 | Se requiere una unidad de potencia                                       |
| El largo de los actuadores pueden ser tan largos como sea requerido (si es que suministra suficiente aceite) | Puede llegar a ser inseguro debido a las altas presiones que se utilizan |
| Fácilmente controlable                                                                                       | Las fugas son comunes                                                    |
| La fuente de alimentación que proporciona la energía se puede colocar lejos del actuador                     | El aceite empleado es flamable                                           |

Los actuadores hidráulicos pueden ser tanto lineales como giratorios. Los actuadores lineales generalmente consisten en cilindros con la misma construcción básica de cilindros neumáticos. La diferencia radica en la robustez de los cilindros, que para el sistema hidráulico están diseñados para soportar presiones de funcionamiento mucho más altas y, por lo tanto, están hechos de acero con un grosor de pared adecuado (en comparación con los cilindros de aluminio de paredes delgadas en el caso de los neumáticos). Los actuadores rotativos pueden volver a ser del tipo de rotación limitada así como del tipo de rotación continua, denominándose estos últimos como motores hidráulicos [58].

### Actuadores no convencionales

Un actuador no convencional es una etiqueta pragmática para combinaciones de controlador de energía / convertidor de energía cuyas funciones se basan en otros efectos físicos que los descritos hasta ahora. Según esta definición, habría que considerar un gran número de principios de los actuadores, incluidos aquellos que no son realmente relevantes en la práctica [57]. La característica más común de estos actuadores es el hecho de que utilizan ciertos fenómenos físicos no convencionales. Sin embargo, las diferentes técnicas utilizadas en estos actuadores exhiben un alto grado de especialización, lo que conduce a un ámbito de aplicación limitado. Lamentablemente, el alto costo de este tipo de actuadores limita la propagación de estos en la industria [55]. Algunos de los actuadores no convencionales más conocidos son los siguientes:

- **Actuadores piezoeléctricos:** Los actuadores piezoeléctricos y electrostáticos convierten la energía eléctrica en energía mecánica sin necesidad de utilizar energía magnética [54]. Ciertos cristales como el cuarzo muestran una relación física entre la tensión mecánica y su carga eléctrica. Si los iones de la red cristalina se desplazan debido a una tensión mecánica aplicada externamente, este desplazamiento se manifiesta como una polarización eléctrica del cristal. El efecto se denomina efecto piezoeléctrico directo y se utiliza para transductores de presión y fuerza [55].

Estos actuadores son esencialmente piezocristales con láminas conductoras en la parte superior e inferior. Cuando se aplica un voltaje eléctrico a través de las dos láminas conductoras, el cristal se expande en dirección transversal. Cuando se invierte la polaridad de la tensión, el cristal se contrae, lo que proporciona una actuación bidireccional [53]. Si, por ejemplo, se aplica un voltaje eléctrico a un cristal piezoeléctrico en forma de disco, el grosor del cristal cambia debido al efecto piezoeléctrico recíproco. Es esta propiedad la que se utiliza en los actuadores [57].

El empleo de actuadores piezoeléctricos se ha incrementado en las últimas décadas. Las principales ventajas [63] que muestran los actuadores piezoeléctricos se muestran en la tabla 2.8.

Tabla 2.8: Ventajas y desventajas de los actuadores piezoeléctricos.

| Ventajas                                | Desventajas               |
|-----------------------------------------|---------------------------|
| Alta resolución                         | Desplazamiento reducido   |
| Buena miniaturización                   | Alto voltaje de operación |
| Accionamiento en diferentes direcciones | No linealidad alta        |
| Grandes fuerzas                         |                           |
| Buena velocidad de respuesta            |                           |
| Sin campos magnéticos                   |                           |
| Bajo consumo de energía                 |                           |

- **Actuadores de aleación con memoria de forma térmica:** Las aleaciones con memoria de forma son materiales que pueden recordar su forma, por ejemplo, pueden volver a alguna forma previamente definida cuando se someten a un determinado procedimiento térmico. Este comportamiento se conoce como efecto de memoria de forma [55]. Tal efecto se basa en la transición de fase sólido-sólido y ocurre en un intervalo de temperatura dado [64]. El tipo más conocido de aleaciones con memoria de forma es la aleación de níquel-titanio, sin embargo, otras aleaciones como cobre-zinc-aluminio-níquel y cobre-aluminio-níquel también reproducen un comportamiento similar y pueden usarse a temperaturas más altas que las aleaciones de níquel-titanio [54].

El empleo de aleaciones con memoria de forma como actuadores reside en su capacidad de volver a la forma original cuando se calientan y se mueven de la martensita a la estructura austenítica produciendo una gran fuerza. Si bien los actuadores de aleación con memoria de forma presentan muchas ventajas, incluida una fácil miniaturización, alta densidad de energía y configuración flexible, presentan algunos inconvenientes importantes relacionados con su baja velocidad, dependencia de la temperatura y baja eficiencia [54]. En la tabla 2.9 se da un resumen de las características de las aleaciones con memoria de forma [55].

Tabla 2.9: Ventajas y desventajas de los actuadores de aleación con memoria de forma térmica.

| Ventajas                                                           | Desventajas                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Buena respuesta a temperatura                                      | Sensible a las variaciones de composición y fabricación;                                    |
| Puede ejercer grandes fuerzas en altas temperaturas                | Las aleaciones de níquel - titanio son costosas                                             |
| La forma puede cambiar en maneras distintas                        | Los elementos bidireccionales solo pueden ejercer pequeñas fuerzas durante el enfriamiento; |
| Diferentes tipos de materiales con diferentes propiedades cada uno | Dinámica lenta                                                                              |
|                                                                    | Fuerte histéresis                                                                           |

- **Actuadores electrostáticos:** Los actuadores electrostáticos se basan en la conocida ley de Coulomb, que se informó en 1780 y describe la fuerza entre dos cargas eléctricas. Cuando las cargas son del mismo signo hay una fuerza positiva que implica repulsión. Si las cargas son de signo opuesto, existe una fuerza negativa que implica atracción. En la práctica, varios actuadores electrostáticos se basan en actuadores capacitivos [54].

Debido a que los actuadores electrostáticos muestran una menor densidad de energía que sus homólogos magnéticos [65], su uso está restringido a actuadores micromecánicos, como los conocidos actuadores de peine [66].

- **Actuadores magnetostrictivos:** Un campo magnético aplicado a materiales ferromagnéticos produce magnetostricción, que fuerza la expansión (en el caso de magnetostricción positiva) o la contracción (por magnetostricción negativa) del elemento que está sometido a un campo magnético estático longitudinal [64]. En realidad, es el mismo efecto el que produce el conocido zumbido indeseado del transformador. Independientemente de la dirección del campo magnético, la magnetostricción se experimenta siempre en la misma dirección y muestra una relación cuadrática entre la deformación y el campo magnético [54].

Los magnetostrictivos están hechos de aleaciones de hierro, níquel y cobalto dopado con tierras raras. El complicado proceso de producción restringe los tamaños y formas

disponibles de los magnetostrictivos y también los hace muy costosos. La principal ventaja de los actuadores magnetostrictivos es su alta densidad de energía, que permite mayores fuerzas de actuación. Sin embargo, solo un número muy limitado de aplicaciones justifica el uso de estos costosos materiales. En la tabla 2.10 se da un resumen de las características de los actuadores magnetostrictivos [55].

Tabla 2.10: Ventajas y desventajas de los actuadores magnetostrictivos.

| Ventajas                                              | Desventajas                                             |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Fuerza de accionamiento alta                          | Costosos                                                |
| Densidad de energía alta                              | Disponibilidad limitada                                 |
| Tiempo de respuesta alto                              | Consumo de energía durante fases estáticas              |
| Los actuadores pueden fabricarse con un solo material | Las propiedades del material dependen de la temperatura |
| Desgaste casi nulo                                    | Características de campo de deformación no lineal       |

- **Actuadores de expansión térmica:** Estos actuadores se basan en la expansión térmica. Mientras que estos últimos aprovechan el cambio de longitud debido a un cambio de temperatura, los elementos de expansión térmica se basan en el cambio de volumen asociado con altos coeficientes térmicos de ciertos materiales sólidos y fluidos. Tras un aumento de temperatura, aumentará el volumen de una cantidad de material encerrado. El material suele estar contenido en algún tipo de cilindro y da lugar al movimiento de un pistón al expandirse [55].

Los actuadores de expansión térmica presentan fuerzas fuertes y desplazamientos relativamente grandes. Los principales inconvenientes son su dependencia de la temperatura, actuación lenta y dificultades de control [54]. Dependiendo del material utilizado, estos elementos de expansión térmica tienen diferentes características de desplazamiento de temperatura. En general, los fluidos muestran una mejor linealidad en las características de desplazamiento de temperatura que los sólidos. Los elementos de expansión generalmente se controlan solo por la temperatura ambiente. Sin embargo, también existen versiones con un elemento calefactor eléctrico adjunto. Las ventajas y desventajas carac-

terísticas de este actuador se muestran en la tabla 2.11.

Tabla 2.11: Ventajas y desventajas de los sensores de expansión térmica.

| Ventajas                                         | Desventajas                                        |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Mecánicamente robusto                            | Mal comportamiento dinámico                        |
| Baratos                                          | Rango de aplicación térmica limitado (-20C a 150C) |
| Modelos de actuadores con desplazamientos largos |                                                    |
| Modelos de actuadores con gran fuerza            |                                                    |

- **Actuadores piezocerámicos:** Los actuadores piezocerámicos son actuadores de estado sólido, ya que explotan un efecto material. Son inherentemente monolíticos, mientras que los actuadores convencionales como los cilindros hidráulicos o el actuador de solenoide necesitan una pieza móvil o deslizante. El ingrediente básico de un actuador de estado sólido es un material activo. Los materiales activos normalmente responden, cuando no están restringidos, con la generación de una tensión mecánica a una entrada de naturaleza no mecánica [54].

Los actuadores de estado sólido y el área estrechamente relacionada de los sistemas estructurales inteligentes constituyen un campo muy amplio que involucra un gran número de disciplinas. Ha experimentado un fuerte crecimiento en los últimos diez a veinte años y, en consecuencia, la cantidad de literatura disponible es muy grande [54]. Los actuadores de estado sólido presentan algunas ventajas peculiares con respecto a los actuadores convencionales [67], pero también tiene algunas desventajas [68] tal y como se muestra en la tabla 2.12.

Tabla 2.12: Ventajas y desventajas de los actuadores piezocerámicos.

| Ventajas                       | Desventajas          |
|--------------------------------|----------------------|
| Alto nivel de configurabilidad | No linealidad alta   |
| Son multifuncionales           | Fuerte histéresis    |
| Buena integrabilidad           | Estabilización lenta |
| Buena escalabilidad            | Variación térmica    |
| Tolerantes al daño             |                      |
| Alto rendimiento específico    |                      |
| Buena compacidad               |                      |
| Modelado simpl                 |                      |

- **Actuadores electroquímicos:** El actuador electroquímico aprovecha ciertas reacciones electroquímicas que, provocadas por una corriente continua, conducen al desarrollo de gas. Este gas está contenido dentro de un volumen cerrado y ejerce una fuerza sobre una membrana. Al invertir el flujo de corriente o acortar el cátodo y el ánodo, la reacción química se puede revertir y el gas se disolverá nuevamente, resultando en una reducción de la presión dentro del volumen sellado [55].

Este actuador aún se encuentra en una etapa experimental, sin embargo se ha incluido para mostrar la variedad de posibles principios de actuación que se pueden emplear para sistemas mecatrónicos. Debido a esta diversidad, el diseñador de un sistema mecatrónico experimentará una gran variedad de actuadores diferentes para elegir. Algunas características esperadas de estos actuadores electroquímicos recientemente propuestos se enumeran en la tabla 2.13 [55].

Tabla 2.13: Ventajas y desventajas de los actuadores electroquímicos

| Ventajas                                           | Desventajas                                                                                                   |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sin consumo de energía durante las fases estáticas | Lentos                                                                                                        |
| Sin partes móviles                                 | Fuertes variaciones en el comportamiento de desplazamiento en el tiempo requieren un control de bucle cerrado |
| Retracción posible sin alimentación externa        | Hasta ahora no se dispone de mucha experiencia con este principio de actuación                                |
| Silencioso                                         |                                                                                                               |

- **Microactuadores:** Los microactuadores son aquellos actuadores cuyos componentes funcionales se fabrican mediante procesos de producción utilizados en el área de la micro tecnología, como el grabado y la litografía [55]. Otra definición establece que cualquier dispositivo producido mediante el ensamblaje de piezas funcionales extremadamente pequeñas de alrededor de 1 a 15 mm se denomina micromáquina [53]. El principio funcional de los microactuadores puede basarse en cualquiera de los efectos físicos que se han descrito hasta ahora en este capítulo, como el electromagnetismo, la expansión térmica, la piezoelectricidad, la electrostricción o la magnetostricción [55].

La mayoría de los microactuadores se fabrican a partir de silicio, que ya se ha utilizado ampliamente para la producción de circuitos integrados y, por lo tanto, está bien investigado. Además, dado que el silicio también se utiliza para la producción de circuitos integrados, el actuador y los circuitos de control se pueden combinar y fabricar juntos. Los microactuadores aún se encuentran en una etapa experimental, por lo que las propiedades típicas y las áreas de aplicación aún no se han determinado claramente, pero en la tabla 2.14 se dan algunas ventajas y desventajas [55].

Tabla 2.14: Ventajas y desventajas de los microactuadores.

| Ventajas                                                                                                                   | Desventajas                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Producción económica utilizando técnicas bien conocidas de la fabricación de circuitos integrados                          | Debido al tamaño del actuador, sólo se pueden realizar fuerzas de desplazamiento y actuación muy pequeñas. |
| Los niveles de voltaje compatibles con microelectrónica permiten la integración del actuador y el controlador en una oblea |                                                                                                            |
| Confiable                                                                                                                  |                                                                                                            |
| Baratos                                                                                                                    |                                                                                                            |

### 2.2.2. No linealidades

Anteriormente, se había estipulado la representación de los errores del actuador en forma de un valor de precisión. Los errores generalmente ocurren debido a la suposición generalmente

adoptada en la mayoría de los sistemas de actuación, donde se considera que son de naturaleza lineal. La gran mayoría de los sistemas de actuación están diseñados para exhibir esta propiedad lo más cerca posible. Sin embargo, la mayoría de estos sistemas presentan no linealidades que introducen errores en la salida esperada del actuador. A continuación se describen algunas de estas no linealidades [58]:

- **Fricción estática:** Al analizar sistemas lineales, a menudo se asume que la fricción es directamente proporcional a la velocidad, por lo tanto, la fuerza de fricción es cero cuando el sistema está estacionario. En realidad, estos sistemas generalmente exhiben una cierta cantidad de fricción estática, que debe superarse antes de que el sistema comience a "moverse". Por lo tanto, parte del par o la fuerza del actuador se desperdicia para superar esta fuerza de fricción. Además, a medida que el actuador alcanza su ubicación final, la velocidad se aproxima a cero y la fuerza o torque del actuador se acercará a un valor que equilibre exactamente la carga de fricción, lo que provocará que el actuador se detenga en algún lugar fuera de la posición deseada. Dado que dicha fricción estática puede tomar varios valores, el actuador llegará a una posición de reposo final ligeramente diferente cada vez, lo que resultará en una pérdida de repetibilidad.
- **Excentricidad:** Esto se aplica generalmente en el contexto de dispositivos rotacionales, principalmente convertidores de movimiento como engranajes y poleas. Las relaciones ideales para engranajes, poleas y similares suponen que el punto de contacto del engranaje o la correa permanece a una distancia fija del centro de rotación para cada engranaje. En realidad, siempre habrá algún error de fabricación entre el centro de rotación y el verdadero centro del círculo de paso del engranaje, lo que provocará cierta excentricidad. La excentricidad puede causar una desviación de la posición angular ideal de entrada y salida.
- **Holgura:** La holgura entre componentes mecánicos es un problema común, particularmente en los sistemas de transmisión de engranajes, así como en varios otros sistemas mecánicos y ocurre cuando se cambia la dirección del movimiento. La reacción del engranaje es solo uno de los muchos fenómenos que se pueden caracterizar como histéresis.
- **Saturación:** Todos los actuadores tienen alguna capacidad de salida máxima, indepen-

dientemente de la demanda de entrada impuesta. Una vez que se excede un límite de entrada específico, la salida del actuador permanece constante sin importar si la entrada aumenta más o no. Esto da como resultado un comportamiento no lineal del actuador una vez que se alcanza el punto de saturación. Los problemas de saturación deben considerarse de manera apropiada cuando se mira el control de bucle cerrado en sistemas mecatrónicos, ya que la demanda impuesta al actuador puede ser demasiado alta, provocando que el actuador alcance la saturación.

- **Banda muerta:** La banda muerta también ocurre en los actuadores y es una región donde la salida permanece cero para un rango específico de valores de entrada. Esto generalmente ocurre cuando el valor de entrada en sí es cercano a cero. Una vez que la entrada se desplaza fuera de la banda muerta, la salida aumentará o disminuirá en consecuencia. Esto ocurre típicamente en servoválvulas hidráulicas, es decir, válvulas que permiten un flujo de fluido proporcional a la señal alimentada a la válvula, pero también controlan la dirección del flujo. Aquí, para la señal de un cierto rango de señales de entrada, el valor permanece cerrado (es decir, sin flujo en ninguna dirección).

### 2.2.3. Criterio para la selección de actuadores

Como en la mayoría de los campos técnicos, los actuadores se diseñan cada vez más con la ayuda de computadoras. El actuador y su estructura mecánica circundante se simulan como un modelo matemático por medio de software disponible comercialmente. Tales modelos son fundamentales para la simulación de la característica de respuesta del sistema en cada caso específico. De esta manera, es posible conocer todas las propiedades importantes del sistema incluso antes de que se construya el actuador, y los parámetros relevantes del actuador se pueden optimizar para lograr los valores deseados [57].

La selección del actuador adecuado es más complicada que la selección de los sensores, principalmente debido a su efecto sobre el comportamiento dinámico del sistema en general. Además, la selección del actuador domina las necesidades de energía y los mecanismos de acoplamiento de todo el sistema [53]. El mecanismo de acoplamiento a veces se puede evitar por completo si el actuador proporciona la salida que se puede conectar directamente al sistema

físico [53]. Se ha establecido un proceso de selección de actuadores según la aplicación deseada, tal y como se muestra en la figura 2.7 [62].

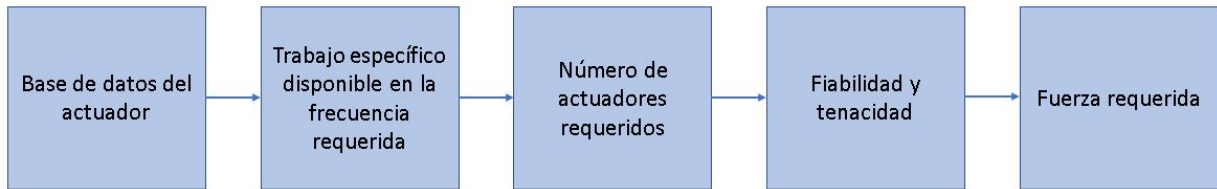


Figura 2.7: Diagrama para la selección de actuadores [62]

Se puede aplicar a cualquier aplicación limitada por la eficiencia de peso del actuador y su capacidad para entregar energía mecánica dentro de una duración específica. Por lo tanto, se debe considerar cuidadosamente el número de actuadores necesarios para una aplicación. El siguiente paso involucra la confiabilidad y las limitaciones ambientales. Finalmente, se calcula la potencia consumida por cada sistema de actuación para seleccionar la solución más eficiente. Este proceso de selección se basa principalmente en la energía suministrada por un sistema de actuación. Se deben agregar más restricciones de diseño en las dimensiones y en las conexiones al mecanismo final de acuerdo con la aplicación considerada [62].

De igual manera, hay una serie de factores que influyen en la selección de un actuador desde una perspectiva funcional y de rendimiento. En la tabla 2.15 se proporcionan varios de estos criterios de selección de actuadores [58].

Tabla 2.15: Criterios para la selección de actuadores.

| Criterios de selección                | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo de movimiento                    | Definir si serán de tipo lineal o rotacional, largo del actuador o ángulo de rotación y su cableado.                                                                                                                                                                                                                     |
| Velocidad                             | Velocidad del actuador dependiendo de la aplicación                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Fuerza de operación                   | La potencia desarrollada por el actuador deberá ser suficiente para la aplicación                                                                                                                                                                                                                                        |
| Resolución, precisión y repetibilidad | Estos parámetros definen la precisión con la que funcionará el sistema de actuación.                                                                                                                                                                                                                                     |
| Respuesta dinámica                    | La respuesta dinámica de un actuador a la demanda que se le impone es en parte una combinación de las características de velocidad y aceleración del actuador.                                                                                                                                                           |
| Cumplimiento                          | La conformidad es el movimiento de un componente en reacción a una fuerza ejercida sobre él.                                                                                                                                                                                                                             |
| Fuente de poder                       | Por lo general, la disponibilidad de la fuente de alimentación puede variar según la ubicación de la aplicación.                                                                                                                                                                                                         |
| Método de medición                    | Los requisitos de medición son fundamentales en la selección del actuador, ya que esto también influirá en la selección del sensor.                                                                                                                                                                                      |
| Integración al sistema                | Además de los aspectos espaciales como el tamaño y el montaje, se consideran otros factores como los requisitos de orientación necesarios, los requisitos de interfaz con otros elementos del sistema, la transferencia de calor y refrigeración necesarios y otros efectos térmicos, vibraciones e interferencias, etc. |
| Costo                                 | Los factores de costos entran en juego en la selección de cualquier componente del sistema, considerándose aquí el costo inicial y el costo de funcionamiento, que incluye la eficiencia en la conversión de energía del actuador.                                                                                       |
| Seguridad                             | Incluya el apagado seguro de los actuadores en caso de emergencias, los modos en los que el actuador puede fallar y cómo dichos modos pueden influir en otros componentes del sistema, protección, confiabilidad e incluso consideraciones de mantenimiento.                                                             |

# Capítulo 3

## Desarrollo

Los avances modernos en la tecnología de la información y la toma de decisiones tales como la integración sinérgica de diferentes dominios fundamentales de la ingeniería, provocaron que los problemas ingenieriles aumenten su complejidad. Estos problemas suelen requerir un enfoque de sistemas de ingeniería multidisciplinarios con el fin de darles solución, estos sistemas son denominados sistemas mecatrónicos. En consecuencia, los ingenieros modernos se enfrentan a desafíos abrumadores, y para ser competitivos en el mercado laboral, deben demostrar tener cualidades tales como ser proactivos, innovadores, integradores, conceptuales y multidisciplinarios. Los ingenieros deben tener profundidad en una disciplina de ingeniería específica, así como una amplitud de ingeniería multidisciplinaria, con un equilibrio entre la teoría y la práctica, además, deben tener amplitud en los valores humanos y empresariales, un ingeniero con tales calificaciones se conoce como ingeniero en mecatrónica [70].

Desde los orígenes de la mecatrónica se ha tratado de analizar a los sistemas de forma holística desde un punto de vista sinérgico intentando integrar componentes heterogéneos tales como mecánicos, electrónicos, informáticos y subsistemas para crear sistemas mecatrónicos [71]. Esta visión sobre lo que es la mecatrónica es compartida por varios autores [72–77]. Salem y Mahfouz [70], adicionan a esta definición que esta rama de la ingeniería tiene la finalidad de gestionar la complejidad, la incertidumbre y la comunicación a través del diseño y fabricación de productos y procesos, partiendo desde el inicio del proceso de diseño, permitiendo así la toma de decisiones complejas. Los productos modernos se consideran productos de mecatrónica, ya

que se trata de sistemas mecánicos integrales con electrónica totalmente integrada, sistema de control inteligente y tecnología de la información [70].

Los productos mecatrónicos modernos son sistemas mecánicos completos con electrónica y tecnología de la información totalmente integradas. Estos productos exigen un enfoque para un desarrollo eficiente [78]. Una de las cuestiones clave en el desarrollo de los sistemas mecatrónicos modernos es la integración estricta de los aspectos mecánicos, de control, eléctricos, electrónicos y de software desde el comienzo de las primeras fases de diseño [79]. Debido a que los productos o sistemas de mecatrónica tienden a ser más eficientes, confiables y de menor costo, el diseño de la mecatrónica, particularmente el diseño conceptual, es muy importante [80]. En los últimos años, la educación en mecatrónica ha recibido cada vez más atención por parte de las universidades [81].

En los sistemas mecatrónicos, la parte física representada por lo mecánico, eléctrico y electrónico es denominado *hardware*, mientras que la parte intangible generalmente respaldada por actividades informáticas es denominada *software*. [72]. Por otro lado, existe una visión distinta en cuanto a sistema se refiere, los sistemas ciber físicos (CPS, por sus siglas en inglés) son considerados como la confluencia de sistemas embebidos, de tiempo real, de sensores distribuidos y de control [82].

### 3.1. Sistemas mecatrónicos vs sistemas ciber físicos

Los CPS son sistemas físicos y de ingeniería cuyas operaciones son monitoreadas, coordinadas, controladas e integradas por un núcleo informático y de comunicación [83]. La mecatrónica y los CPS son dos diferentes perspectivas de un concepto global denominado 'sistema'. Cada uno tiene antecedente culturales distintos; diseño de *software* para los CPS y diseño de *hardware* para la mecatrónica [72]. Estas dos clases de productos son cada vez más eficientes si se miden por las nuevas funcionalidades que ofrecen, por su compacidad y por las tecnologías que integran.

Existe una visión en el que los sistemas mecatrónicos son basados principalmente en *hard-*

*ware*, y el *software* es visto como una forma de optimizar el sistema. Asimismo, para los CPS, se propone que el hardware sea visto como una plataforma para dar una dimensión física al ciber sistema y su *software* asociado. Estas dos perspectivas ofrecen distintos metodos para obtener un sistema automatizado completo. [72]. A pesar de ser enfoques similares, existen factores que permiten diferenciar las dos clases de productos.

### 3.1.1. Diferencias entre sistemas mecatrónicos y ciber físicos

La diferencia más evidente en estos enfoques se centra en la electromecánica. Para unos, esta rama de la ingeniería suele ser considerada como el *hardware* de los sistemas mecatrónicos [84]; para otros, es considerada erróneamente como sinónimo de la mecatrónica [85]. De acuerdo con Bricogne [86], la electromecánica es, al mismo tiempo, el trasfondo y parte fundamental de los productos mecatrónicos.

En la figura 3.1, se presenta un modelo en el que se sugiere que la electromecánica sea vista como el estudio de la interacción energética entre el electromagnetismo y la mecánica [87]. En este mismo modelo se introduce un segundo concepto denominado controlmecánica, este concepto completa el mencionado anteriormente añadiendo una relación entre el control y la electromecánica. Asimismo, en esta visión se sugiere que la electromecánica es parte fundamental de la mecatrónica, ya que los ingenieros mecatrónicos tienen la capacidad de integrar sistemas electromecánicos y cumplir de igual manera la función de control.

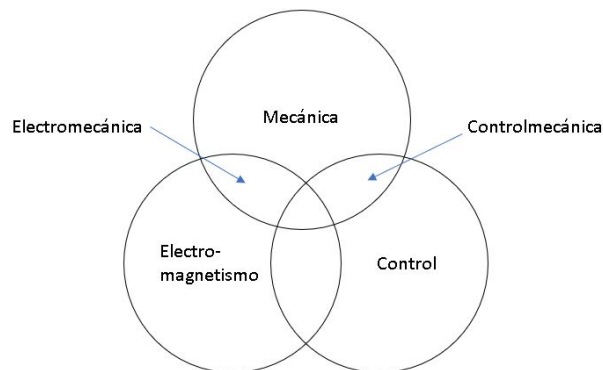


Figura 3.1: Relación entre electromecánica y controlmecánica.

Finalmente, la relación entre la mecatrónica y la electromecánica según Lyshevski [84] se centra en que la electromecánica abarca tanto la ingeniería mecánica como la eléctrica, mientras

que la mecatrónica es el nexo entre las antes mencionadas añadiendo la ingeniería informática o *software* de por medio tal y como se muestra en la figura 3.2.

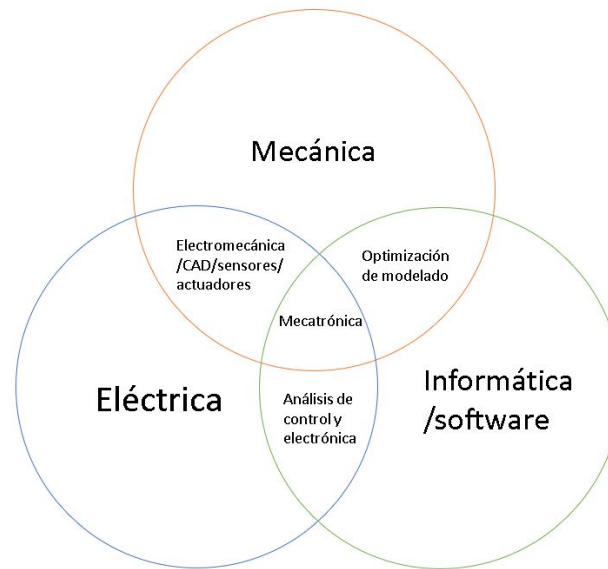


Figura 3.2: Relación entre electromecánica y controlmecánica.

Ambos esquemas concuerdan en que la electromecánica solo lidia con mecánica y electricidad-electrónica. Se concluye que esta ciencia puede ser incluida en la mecatrónica desde el punto de vista de los componentes utilizados para desarrollar un sistema automatizado o autónomo. El nivel de complejidad entre los CPS, los sistemas mecatrónicos y electromecánicos es diferente; mientras que los CPS y la mecatrónica mezclan *hardware* y *software* en diferentes proporciones, la electromecánica es considerada como la parte del *hardware* de la mecatrónica y de los CPS. La electromecánica es parte de los CPS y la mecatrónica mediante el uso de actuadores y sensores que se incorporan en ellos. Estas diferencias pueden influir en las metodologías de diseño, la estructura organizativa y los procesos de diseño.

Hoy en día la filosofía del diseño mecatrónico está enfocada en una arquitectura estándar, por otro lado, los CPS son sistemas distribuidos per se, en la figura 3.3 se muestra esta diferencia. En esta figura se indica como es que los sistemas de hoy tienen una arquitectura rígida o lineal mientras que las futuras arquitecturas de CPS están más enfocadas a ser más distribuidas y flexibles.

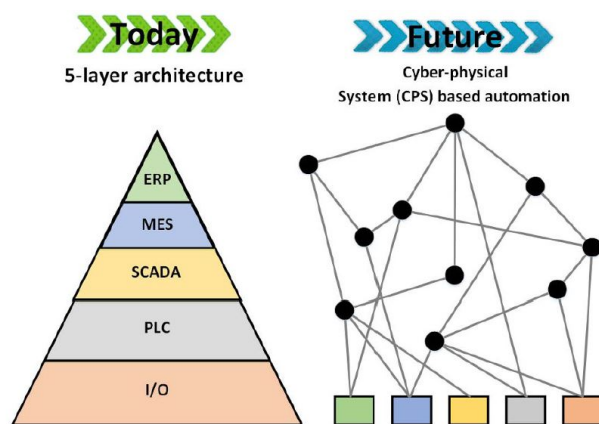


Figura 3.3: Arquitectura de los CPS actuales vs los futuros [88]

El desarrollo de productos futuros demanda la concepción, diseño, implementación y operación de sistemas complejos, dichos sistemas son el resultado de las interacciones multidisciplinares donde los CPS manejan sistemas mecatrónicos [71]. Cabe resaltar, que los sistemas mecatrónicos y CPS son por naturaleza diferentes, es decir, tienen enfoque y objetivo distintos, pero lo más importante es que trabajan en conjunto. Los CPS consideran a los sistemas mecatrónicos como una parte integral de ellos, la tabla 3.1 muestra las diferencias en los parámetros más importantes a considerar al desarrollar un sistema mecatrónico y un CPS.

Tabla 3.1: Diferencias entre sistema mecatrónico y CPS.

| Parámetros                      | Tipos de producto |                    |
|---------------------------------|-------------------|--------------------|
|                                 | Mecatrónicos      | Ciberfísicos (CPS) |
| Mantenibilidad \ Disponibilidad | +                 |                    |
| Escalabilidad                   |                   | ++                 |
| Estabilidad                     |                   | +                  |
| Robustez                        |                   | ++                 |
| Eficiencia                      | +                 | +                  |
| Autónomo                        |                   | ++                 |
| Eficiencia energética           | +                 | ++                 |
| Seguridad                       | ++                | ++                 |
| Compacidad                      | +                 |                    |
| Fiabilidad                      | ++                | +                  |
| Presición                       | ++                | +                  |
| Comunicación                    | ++                | ++                 |

En la tabla anterior se utiliza '++' o '+' con el fin de indicar si un parámetro característico tiene un impacto significativo o normal respectivamente, en cada tipo de producto. Las celdas

en blanco indican que el parámetro en cuestión no representa impacto alguno en la clasificación o producto. La Tabla 3.1 no es más que un recopilatorio de investigaciones de diversos autores que han determinado los parámetros que caracterizan ambos tipos de productos. Por ejemplo, para los mecatrónicos serían: precisión, comunicación, fiabilidad y seguridad [74, 89–91]. Mientras que, para los ciberfísicos serían: estabilidad, rendimiento, fiabilidad, seguridad, robustez, eficiencia energética, precisión y comunicación [92–94]. Por tanto, mediante la utilización de estos parámetros es posible caracterizar el tipo de producto para elegir el proceso de diseño más adecuado.

## 3.2. Metodología de diseño

La mayoría de las universidades oferta cursos relacionados con la mecatrónica, ya sea en el departamento de mecánica o en el departamento de electrónica. Los enfoques que normalmente se utilizan se centran en las tecnologías integradas en los sistemas mecatrónicos y CPS, tales como sensores, actuadores y microprocesadores [80]. En dichos cursos se presta relativamente poca atención al proceso de diseñar e integrar un producto de mecatrónica basado en una metodología de diseño sistemático [95–98], el cual es clave para el desarrollo de productos de mecatrónica exitosos.

El diseño mecatrónico es considerado como un proceso secuencial en el que se propone una solución a un problema mediante el diseño, siguiendo una serie de pasos prescritos que parten desde los requerimientos del cliente hasta la validación del diseño final [99]. Sin embargo, la complejidad del diseño multidisciplinario resaltó las limitaciones de este enfoque. En respuesta a esta problemática, se espera que el ingeniero mecatrónico tenga la capacidad de diseñar productos con sinergia e integración, que cumplan con características como alto rendimiento, velocidad, precisión, eficiencia, funcionalidad y lo más importante, reducir costos de producción. De igual manera, con el fin de evaluar conceptos generados durante el proceso de diseño, sin construir y probar cada uno, el ingeniero mecatrónico debe ser experto en el modelado, análisis de simulación y control de sistemas dinámicos y comprender los problemas clave en la implementación de hardware [100].

El modelado de un producto mecatrónico es la representación digital mediante software que es utilizado para sustituir un sistema real, estos se basan en un procedimiento matemático con el fin de describir su comportamiento con cierta precisión [78]. El propósito del modelado y la simulación es verificar si los modelos de diseño cumplen con el desempeño esperado. Para que la simulación tenga éxito, es decir, que se acerque al comportamiento real, el modelado se convierte en el punto clave [80]. El proceso de modelado o de diseño es inherentemente tanto un proceso creativo como un proceso de reutilización del diseño. La proporción entre el proceso creativo y la reutilización de conceptos anteriores depende principalmente de la brecha entre el nuevo conjunto de requisitos que satisfará al cliente y los diseños que la empresa utilizó anteriormente para otras aplicaciones [101].

En cualquier industria la información proviene internamente del conocimiento de la empresa derivado de ingenieros, procedimientos y prácticas y externamente cuando es verdaderamente necesario, es decir, de otras compañías y directivas. Durante el proceso de diseño, se reutiliza una gran cantidad de información de diseños anteriores y se modifican cuando es necesario de tal manera que se cumplan los requerimientos del cliente. Por lo tanto, el negocio principal de las empresas que se dedican al diseño y desarrollo de equipo proviene de la riqueza de su conocimiento interno o base de datos. La información interna es el conocimiento de los productos originales construidos a lo largo de los años y las competencias de la empresa adquiridas en su organización como, por ejemplo, procedimientos de diseño, conocimientos tecnológicos, información de los procedimientos de retroalimentación de los clientes. Sin embargo, esta información reutilizada no siempre es suficiente para desarrollar nuevos productos [101].

La modificación de esta información inicial extraída de lo que se ha echo anteriormente para cumplir con los requisitos del cliente, hace necesaria la búsqueda de nuevos conocimientos externos. La información externa son los conocimientos adicionales que los diseñadores tienen que adquirir del exterior para captar conocimientos sobre nuevas tecnologías, nuevas tendencias de los clientes e incluso nuevos deseos de la sociedad, buscando siempre innovar en sus propuestas. Así, el proceso de diseño, que es principalmente un proceso de rediseño, es una etapa crucial para que las empresas pueda sacar ventaja sobre la competencia. La información de diseño que se utilizó en la fase de diseño inicial se reutilizará para producir nuevos produc-

tos y ayudará en el proceso de diseño [101]. Esta metodología de diseño se ilustra en la figura 3.4

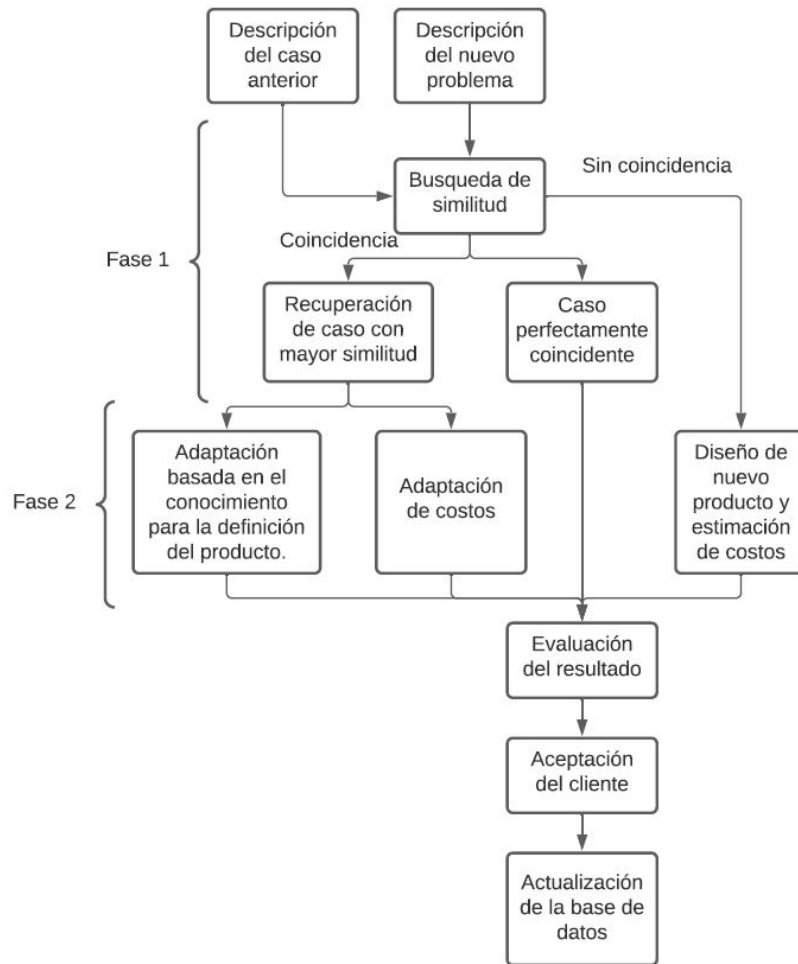


Figura 3.4: Metodología de diseño mediante adaptación de conceptos anteriores [101].

donde la primera fase de la metodología se trata de una búsqueda de similitud entre el nuevo caso a diseñar y todos los casos anteriores que fueron capitalizados en la biblioteca. Si se encuentra una coincidencia exacta, el nuevo caso se considera idéntico al anterior y, en consecuencia, la solución del caso anterior puede considerarse la solución del nuevo caso. Cuando uno o varios se consideran cercanos, la solución de uno de esos casos se selecciona en función de la experiencia de los diseñadores y se considera la solución de referencia que los diseñadores adaptarán y mejorarán con el fin de cumplir con los nuevos requerimientos. Cuando ningún caso puede considerarse como referencia, la estrategia de búsqueda no tiene éxito y los diseñadores tienen que diseñar manualmente un nuevo producto. La segunda fase es la adaptación del caso de referencia para crear una solución a la nueva problemática. El última

fase se ocupa de la verificación tanto del rendimiento de fabricación (coste, medio ambiente, calidad) como del rendimiento del producto (técnico y de comportamiento). Para finalizar el proceso de diseño, cada nuevo diseño aceptado o no por el cliente, se almacena en la biblioteca para ser capitalizado y eventualmente reutilizado como referencia para un nuevo diseño [101].

### 3.2.1. Diseño de sistemas mecatrónicos y CPS

Algunas de las diferencias entre los CPS y los sistemas mecatrónicos pueden explicarse por los orígenes de estos dominios. Con esta diversidad de antecedentes, sus procesos, la estructura organizativa del proyecto y los procedimientos asociados podrían ser considerablemente diferentes. Por lo tanto, un producto mecatrónico, debido a sus antecedentes, no se diseñará con la misma metodología que un producto basado en CPS [72]. Existen dos principales tipos de procesos utilizados para obtener un producto integrado: la integración funcional y física [86]. El objetivo de la integración funcional es integrar tantas funciones como sea posible en un producto. Esto se puede lograr mediante un enfoque orientado a *software* o *hardware*, por lo tanto, se puede decir que existen dos métodos para realizar una integración funcional [102].

Los enfoques orientados al *software* utilizan la desmaterialización y fusión de algunas funcionalidades, es decir, se puede lograr incorporando nuevo *software* e implementando nuevos componentes en una plataforma de *hardware* [72]. En su contraparte se encuentra el enfoque orientado a *hardware*, este trabaja en componentes fusionando nuevas funcionalidades en una. Este enfoque se describe como integración física, que tienen de objetivo reducir las dimensiones y el peso de un sistema. Estas reducciones se pueden realizar minimizando las dimensiones y la masa de los componentes, de modo que se obtenga un producto diseñado para ser compacto y ligero [86]. Cabe resaltar, que integrar un nuevo componente también es una forma de implementar una o varias funcionalidades nuevas. Un componente que no tiene una función en el sistema rara vez se implementa, a menos que ayude a cumplir una función o una restricción para fines de seguridad.

El diseño mecatrónico se considera como un proceso secuencial en el que se genera una

solución de diseño siguiendo una serie de pasos prescritos que parten desde los requerimientos del cliente hasta la validación con el fin de resolver una problemática [103]. Sin embargo, la complejidad del diseño multidisciplinario mostró los límites de este enfoque. Por lo tanto, el 'modelo V' fue ampliamente adoptado por la industria [7].

### 3.3. Modelo V

Es de suma importancia que los estudiantes comprendan el proceso de desarrollo de los productos y sepan que las modificaciones posteriores generarán más costos de desarrollo. En ingeniería de sistemas, el modelo V se utiliza como modelo estándar para el desarrollo de sistemas complejos, el cual se ilustra en la figura 3.5 [80]. Luego, se estandarizó para mecatrónica en la directriz VDI 2206 [104]. El objetivo de esta metodología es establecer un concepto de solución de dominio cruzado que describa las principales características operativas físicas y lógicas del futuro producto.

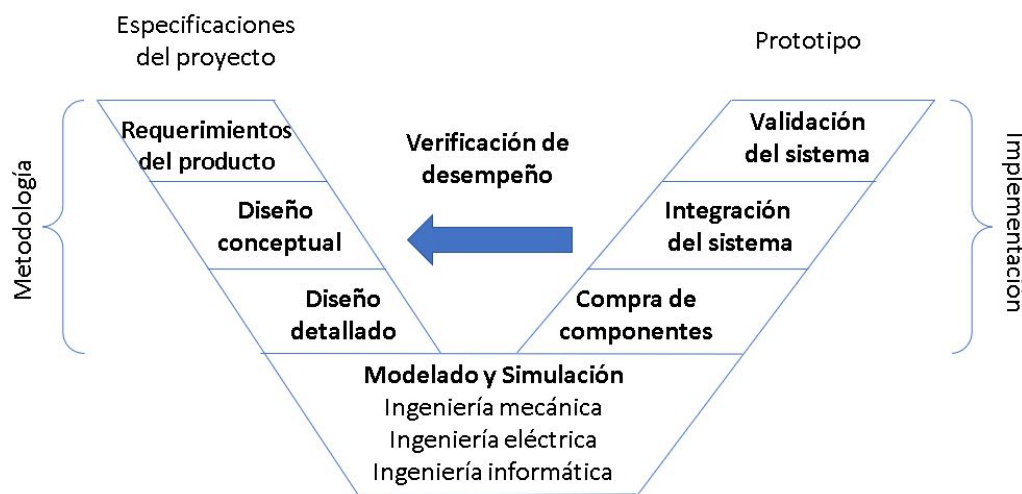


Figura 3.5: Modelo V mecatrónico según la directriz VDI 2206 [104].

Salem y Mahfouz, explican que este método se divide en 3 fases principales, que serán descritas como: la entrada, la base y la salida. La entrada propone definir y analizar todos los requerimientos del sistema total, las subfunciones y subsistemas están definidos y serán desarrollados simultáneamente por los equipos de desarrollo del proyecto. Posteriormente, en la base del modelo V se verifican subfunciones y se prueban subsistemas a través del modelado y

análisis de modelos en los dominios de ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica y tecnología de la información. Finalmente, en la salida se integran las subfunciones verificadas y los subsistemas probados, y se verifica el rendimiento del sistema integrado, en dado caso que se requiera mejorar el resultado, es posible repetir todo el procedimiento desde la fase inicial [70].

Sin embargo, Mcharek et. al detallan de manera más extensa la metodología del modelo V y lo dividen en 5 fases [105]:

- **Fase 1: Requerimientos del producto**

Los requerimientos del cliente se identifican en este paso. Una buena comprensión de las necesidades del cliente es la clave para proporcionar el sistema adecuado [106]. Los requisitos deben ser claros y concisos porque este paso es fundamental para tener una primera estimación de los recursos y la asignación de tiempo.

- **Fase 2: Diseño conceptual**

Según los requisitos, los ingenieros del sistema identifican las diferentes funciones del sistema. Esto proporciona una mayor comprensión de la complejidad del sistema. Para cada función, se define un subsistema funcional [107]. Por tanto, podemos obtener distintas arquitecturas en función de los subsistemas funcionales elegidos. El diseño funcional y arquitectónico se puede combinar en un diseño conceptual [108]. Este paso es importante porque tiene un impacto directo en los principales parámetros, propiedades y costo.

- **Fase 3: Diseño detallado**

El paso de diseño detallado se encuentra entre las dos fases generales del modelo V, diseño e integración. La arquitectura previamente definida se transforma en soluciones técnicas al asociar componentes físicos a los subsistemas funcionales. El problema general del diseño se divide en modelos disciplinarios. En este paso, el sistema comienza a tomar forma y se realizan los primeros análisis para modelar el sistema [109].

- **Fase 4: Integración y verificación**

En este paso se realizan diversos análisis y simulaciones con el fin de probar el sistema contra las leyes físicas a las que se somete el sistema. El objetivo de esta fase es recomponer el sistema y evaluar la integración de los diferentes componentes [110]. Posteriormente,

se verifican y analizan el cumplimiento de los requerimientos y las propiedades en función de la naturaleza de los componentes tales como: termodinámica, vibración, dimensiones, entre otros.

■ **Fase 5: Validación del sistema**

En esta última fase, se validan los requisitos relacionados con el sistema global. Esta validación puede ser experimental o virtual utilizando herramientas de análisis y optimización de diseño multidisciplinar [111].

# Capítulo 4

## Resultados

Esta sección tiene la finalidad de describir las especificaciones que el módulo didáctico propuesto debe cumplir para ser considerado apto para la enseñanza de procesos basados en PLC. Es de resaltar que estas especificaciones no pretenden inhibir la introducción de avances tecnológicos, por el contrario, se espera que se consideren enfoques alternativos con el fin de mejorar los niveles de calidad, reducir el costo del equipo, fomentar que el equipo sea intuitivo para el usuario e introducir a los alumnos tecnologías nuevas en la industria de la automatización. De igual manera, se pretende detallar la metodología utilizada para desarrollar el proyecto, el cual esta basado en el 'modelo V'. Finalmente, se presentaran los resultados obtenidos de dicha metodología y se validarán.

### 4.1. Consideraciones de diseño y funcionalidad

El propósito de este proyecto es el desarrollo de un módulo didáctico para la enseñanza de PLC para alumnos de ingeniería mecatrónica. Basandonos en lo anterior mencionado y tomando como referencia la metodología de diseño del modelo V, el desarrollo del proyecto debe partir desde los requerimientos del producto, los cuales son enlistados a continuación:

- **Didáctico**

El sistema debe tener la capacidad de proporcionar las herramientas requeridas para ayudar a los alumnos de ingeniería a comprender el principio de funcionamiento de los

sistemas basados en PLC.

- **Modular**

El diseño modular consiste en desarrollar un producto que cuente con una arquitectura basada en unidades o módulos desmontables, permitiendo la flexibilidad de adaptar o modificar el proceso para crear un producto diferente. Esta característica permite a los alumnos configurar el módulo didáctico con el fin de que sea utilizado en diferentes niveles aprendizaje.

- **Innovador**

Debe contar con la tecnología más actualizada en sistemas automatizados. Esta característica es de las más importantes, debido a que existe una práctica común en los sistemas educativos actuales en el que se enseñan metodologías y sistemas obsoletos a los alumnos, provocando que no estén preparados a lo que realmente se van a enfrentar en su vida laboral futura.

- **Intuitivo**

Independientemente de la experiencia en manejo de sistemas basados en PLC, el usuario debe ser capaz de comprender el principio de funcionamiento del módulo sin la necesidad de un tutor que lo este guiando en el proceso. Cabe resaltar, que un conocimiento básico de los sistemas basados en PLC es requerido.

- **Robusto**

El módulo didáctico debe ser lo suficientemente robusto con el fin de soportar los fenómenos físicos ejercidos por si mismo, tales como: tensiones, esfuerzos, cargas, entre otros.

La estación procesará tres diferentes tipos de polímeros: acetal blanco, acetal negro y nylatron azul. Estos termoplásticos fueron seleccionados a razón de las propiedades enlistadas a continuación:

- Alta resistencia al desgaste
- Alta dureza superficial
- Buena mecanizabilidad

- Buen deslizamiento
- Diferenciación por colores

Estas propiedades beneficiarán el desarrollo del módulo didáctico al darle unas condiciones óptimas de fabricación, integración y funcionamiento.

#### 4.1.1. Funcionalidad

1. La estación modular podrá ser utilizada de dos maneras diferentes, que son: la configuración de *hardware* y *software* 'original' o la configuración personalizada de ambos aspectos con el fin de realizar prácticas de diferentes niveles de dificultad.
2. El diseño contará con estaciones modulares, que para este proyecto se les denominará 'subestaciones', con el fin de tener diferentes configuraciones de trabajo. Cada subestación funcionará de manera autónoma, es decir, sin la necesidad de la presencia de las demás subestaciones en el módulo didáctico.
3. Se integrará una interfaz hombre-máquina programable la cual contará con las siguientes funcionalidades:
  - **Modo manual:** Permitirá el accionamiento de las diferentes tecnologías integradas en las subestaciones a través de pulsadores.
  - **Modo aprendizaje:** Una vez seleccionada esta modalidad, permitirá al usuario consultar información detallada de cada una de las tecnologías integradas en el sistema. Cabe mencionar, que el nombre de 'modo aprendizaje' no hace alusión a ningún tipo de inteligencia artificial implementada.
4. Se utilizarán conectores de cambio rápido neumáticos y eléctricos para cada subestación con el fin de facilitar el cambio de configuración de *hardware* y *software* del módulo.
5. La placa principal de la estación tendrá ranuras tipo 'T' en los planos 'X' y 'Y' para sujeción de los componentes, esto permitirá flexibilidad y versatilidad en el ajuste de las subestaciones.

6. La estación contará con 7 subestaciones, las cuales desarrollarán el conocimiento y experiencia del usuario al presentársele diferentes tecnologías integradas.
7. Se implementará una placa visible para el usuario donde se montarán todos los componentes neumáticos y de control que se hayan integrado al sistema.
8. Cada tecnología que se haya implementado en el sistema será acompañado de un led verde parpadeante que facilitará al usuario la ubicación de cada componente del módulo cuando se utilice el modo aprendizaje de la interfaz.

## 4.2. Diseño conceptual

En esta sección, tal y como lo señala el modelo V, se definen las funciones que desempeñará la estación a través del diseño de subestaciones. De igual manera, se determinará de manera general la arquitectura que tendrá el diseño final y será representado a través de un *layout*.

### 4.2.1. Subestaciones

El módulo didáctico contará con 7 subestaciones, los cuales presentarán diferentes tecnologías al usuario. La funcionalidad de cada módulo es explicado brevemente a continuación:

1. **Pick and place:** esta operación consiste en extraer los productos de una ubicación para ordenarlos y colocarlos en otro sitio.
2. **Feeding:** esta operación transporta las piezas y las coloca en la posición deseada para su posterior procesamiento.
3. **Indexer:** este tipo de proceso utiliza indexadores o actuadores eléctricos, los cuales permiten un movimiento rotativo por pasos sin acumulamiento de error. Estas herramientas normalmente son utilizadas en automatización para realizar un proceso complejo con diferentes estaciones en cada paso del indexador.
4. **Processing:** operación que automatiza un proceso de fabricación manual mediante la integración de productos neumáticos, hidráulicos, eléctricos y mecánicos.

5. **Validation:** este tipo de procesos utilizan sistemas de medición para verificar el cumplimiento de alguna medida o proceso anterior.
6. **Transporting:** permiten el transporte del producto a través del sistema. Esta tarea puede ser ejecutada con diferentes tipos de tecnologías tales como: bandas transportadoras, actuadores neumáticos, ventosas, entre otros.
7. **Classification:** proceso en el cual se clasifica el producto terminado mediante la utilización de tecnologías integradas en el sistema.

La configuración denominada 'diseño original' tendrá una arquitectura simple y lineal tal y como se muestra en la figura 4.1. Este será el nivel de aprendizaje más avanzado al que se podrá llegar con el equipo, ya que se utiliza la totalidad de las subestaciones integradas en completa armonía.

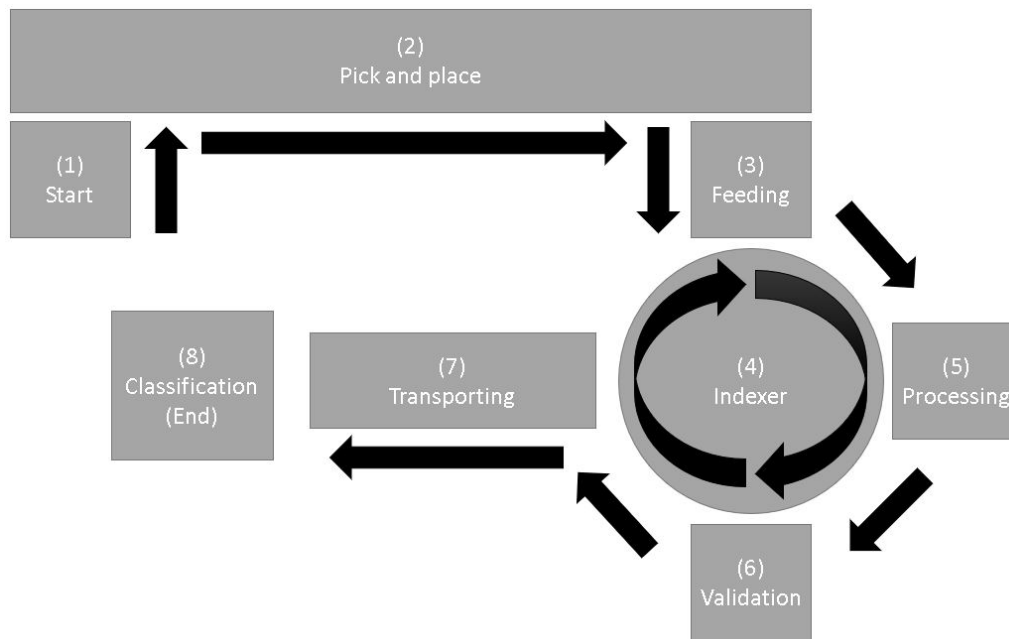


Figura 4.1: Layout del 'diseño original' del módulo didáctico.

Esta configuración consiste en alimentar al sistema con los diferentes polímeros establecidos en la sección anterior a través de la estación (1). Una vez detectada la materia prima, el sistema *pick and place* (2) recoge y transporta el material a la subestación de *feeding* (3). Posteriormente, este subsistema desplaza el material y alimenta al *indexer* con la finalidad de transportar los componentes a través de las subestaciones de *processing* (5) y *validation* (6)

para transformar el material y validar el proceso respectivamente. Finalmente, la subestación *transporting* (7) toma el material del *indexer* (4) y lo transporta a *classification* (8) para su organización. Este diseño simula el manejo, producción, validación y clasificación de una línea automatizada en la industria maquiladora.

### 4.3. Diseño detallado

En esta sección, se proporcionan los detalles geométricos y la representación concreta del diseño conceptual. De igual manera, se explicará detalladamente la arquitectura y funcionamiento del módulo, así como la integración mecánica, eléctrica y neumática de las tecnologías. El diseño detallado lleva la actividad de diseño a nivel de instrumentación. Esta fase de diseño expone inevitablemente los defectos en la estructura arquitectónica y las modificaciones se verán facilitadas por tener menos detalles por manipular que los que estarían presentes durante la fase de control.

El proceso que se realizará en la estación consiste en el manejo, procesamiento, validación y organización de piezas de acetal negro y blanco y nylatron azul. Las medidas generales de la materia prima que alimentará el sistema son de 1.500in. X 0.750in. (diámetro X altura). Durante el proceso, se barrenarán las piezas con cortadores de 0.250in. de diámetro. Finalmente, se valirány clasificarán.

#### 4.3.1. Estructura general

La estructura general del módulo didáctico contendrá la totalidad del herramental y se considera que sea fabricada en perfil extruido de aluminio. Las construcciones con este material ofrecen un alto beneficio estético, debido a su acabado de primera y su aspecto limpio y pulido, los perfiles tienen como ventaja ser bastante livianos y adaptables, Además de esto, son capaces de resistir una gran cantidad de peso, sirviendo como conexión o cierre entre estructuras. También, garantiza que las uniones sean extremadamente resistentes y durables ante el paso del tiempo, conservando su forma y estructura. En la figura 4.2 se muestra la estructura propuesta para el presente proyecto, sus medidas generales son de 35.365in. x

38.625in. x 38.031in. (ancho x largo x alto),

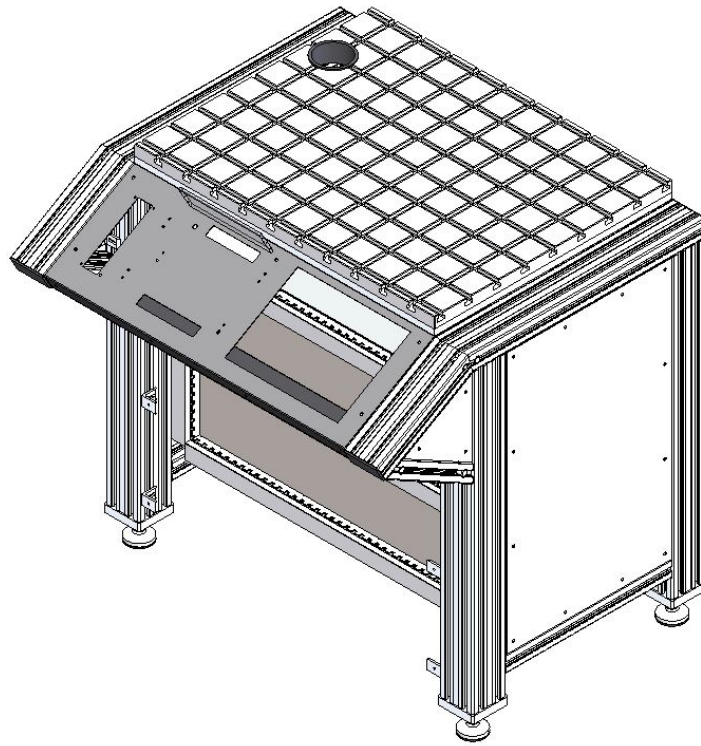


Figura 4.2: *Estructura general del módulo didáctico.*

Además, se utilizarán placas de ABS negro para cubrir los huecos laterales que tiene la estructura. En la parte interna de la estructura se instalará una placa de aluminio 6061 con el fin de montar los módulos de entradas y salidas y el distribución neumática. En la parte frontal se tiene una estructura inclinada ergonómicamente hacia el usuario con una placa de ABS negro perforada. Estas perforaciones serán utilizadas más adelante para instalar la botonera de control, los amplificadores y controles de los sensores y una interfaz. En la vista posterior se aprecia el montaje del gabinete, este se encuentra instalado por la parte interior de la estructura con el fin de hacerla más compacta, tal y como se muestra en la figura 4.3.

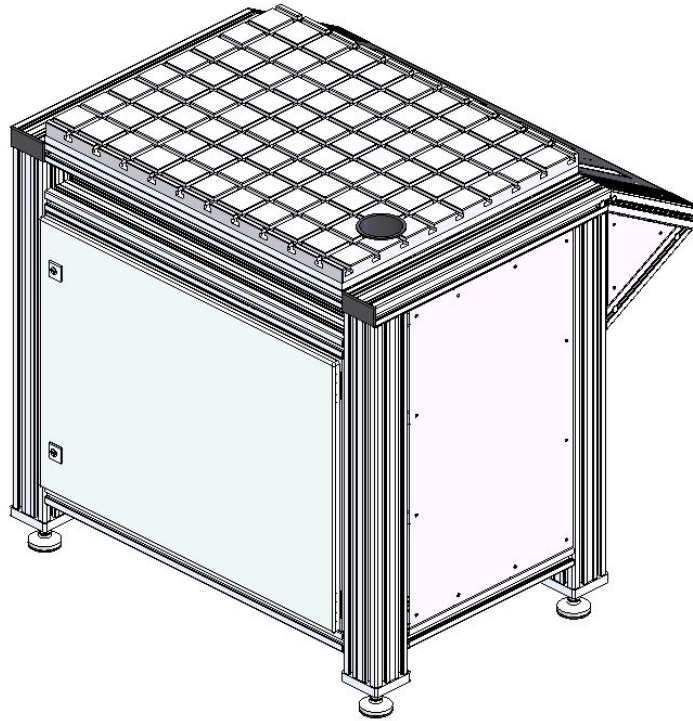


Figura 4.3: *Vista posterior de la estructura general.*

Se propone que la placa principal ranurada sea fabricada de acero A36 ya que este material es resistente a operaciones de punzonado. En este caso, en la estación no habrá operaciones con matrices y punzones, pero esta propiedad le permite resistir golpes repetitivos ejercidos sobre la placa. De igual manera, se propone bañar la placa en un tratamiento de niquelado superficial, con el fin de aumentar su resistencia al desgaste. Como se había mencionado antes, las ranuras permitirán la flexibilidad de montaje sobre la placa mediante la utilización de *T-nuts*.

#### 4.3.2. Pick and place

La primera subestación del 'diseño original' es el *pick and place*, consiste en un arreglo de actuadores en total sinergia que permite un movimiento en los ejes *X* y *Z* para la recolección y posicionamiento de la materia prima tal y como se muestra en la figura 4.4.

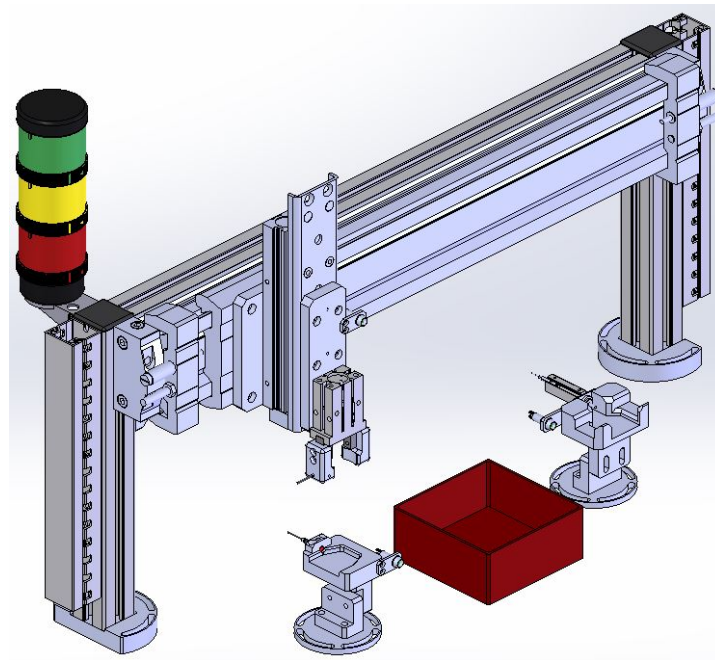


Figura 4.4: *Vista general del pick and place.*

Este arreglo es sujetado por medio de *T-nuts* en una estructura de perfil extruido de 45mm x 45mm. Las características de los actuadores neumáticos que conforman dicho arreglo se enlistan a continuación:

- Cilindro neumático sin vástago de 40mm de *bore* y 400mm de *stroke*. Contará con 3 sensores de carrera (inicio, final e intermedio).
- Mesa deslizante de precisión de 20mm de *bore* y 100mm de *stroke*. Contará con 2 sensores de carrera (extendido y retraído).
- *Gripper* o pinza paralela neumática de 20mm de *bore* y 10mm de *stroke* por pinza. Contará con 2 sensores de carrera (extendido y retraído).

El cilindro neumático sin vástago cuenta con 3 sensores de carrera con la finalidad de abarcar 3 posiciones diferentes de acción. La primera posición es la ubicación donde se realiza la recolección de la materia prima. Mientras que la segunda y la tercera posición son para la distribución de las mismas. El 'diseño original' dicta que la 2da posición es simplemente un contenedor de rechazo donde se colocan las piezas de color incorrecto que se hayan alimentado. La tercera posición es donde el *pick and place* coloca la materia prima si se alimenta el color correcto. Las diferentes posiciones mencionadas se ilustran en la figura 4.5.

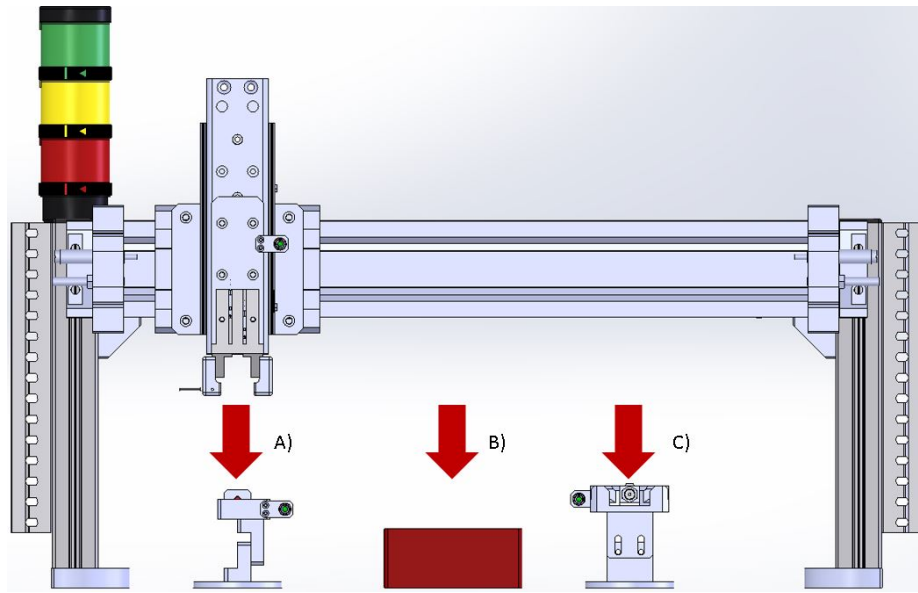


Figura 4.5: (A) Inicio (B) Contenedor de rechazo (C) Feeder

La base donde el sistema *pick and place* recolecta la materia prima (A) contará con un sensor de color conectado a un módulo controlador multisensor, el cual permite mandar distintas señales al PLC (figura 4.6). Este sensor identifica que tipo de material se alimenta al sistema para posteriormente transportarlos.

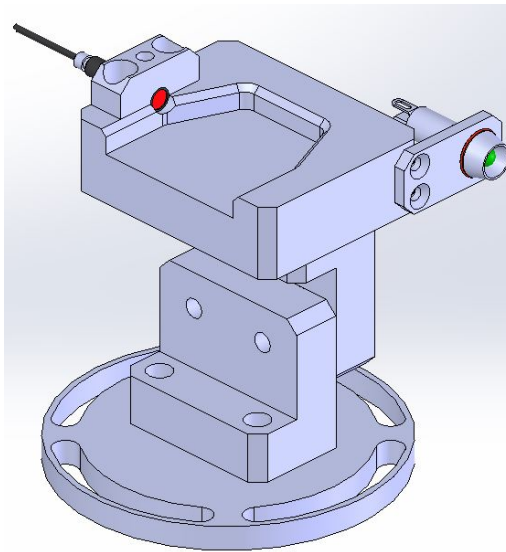


Figura 4.6: Base de inicio del módulo.

### 4.3.3. Feeding

Si se alimenta el color correcto en la base inicial, esta subestación sería el destino de la materia prima. Esta subestación es la más sencilla de todas las implementadas en el módulo didáctico, esto afirmación se debe a que es la encargada de alimentar el *indexer* por medio de un cilindro neumático lineal de 6mm de *bore* y 20mm de *stroke* (figura 4.7). La base contará con una fibra óptica para detectar la presencia de piezas para posteriormente transportarlas al siguiente proceso.

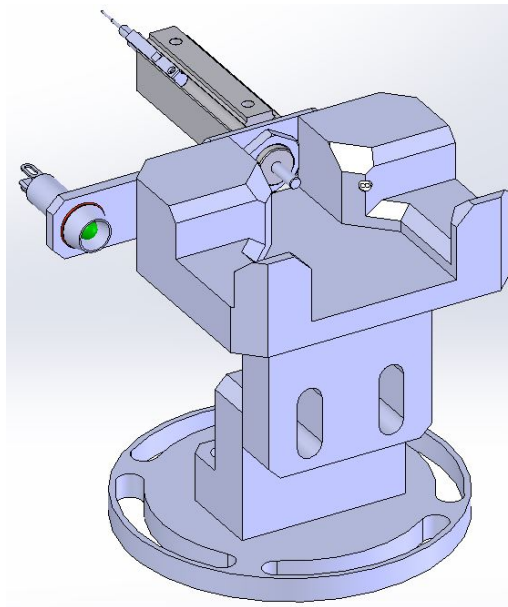


Figura 4.7: Diseño de subestación feeder.

### 4.3.4. Indexer

Esta subestación es controlada mediante un actuador giratorio eléctrico de alta precisión. El actuador tiene la capacidad de realizar movimientos angulares a pasos con error no acumulable a velocidad y aceleración angular programada. Este tiene atornillado una placa de aluminio 6061 con ocho estaciones, el cual a su vez tiene ensamblado un actuador neumático giratorio estilo *clamp* por cada estación. Cada uno de estos actuadores tienen la función de sujetar las piezas que vayan siendo alimentadas por medio del *feeder* al *indexer* tal y como se ilustra en la figura 4.8.

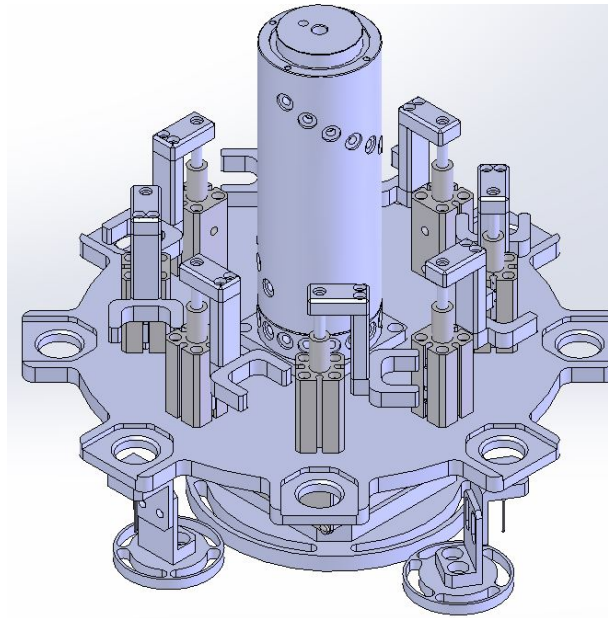


Figura 4.8: Diseño de subestación *indexer*.

El cople neumático al centro de la placa giratoria es un dispositivo que permite la conexión de actuadores neumáticos sobre montaduras giratorias. Este accesorio cuenta con 16 entradas de aire distribuidas en el cuerpo principal del cople, mientras que las salidas de aire giran independientemente del cuerpo principal del cople junto con la placa de ocho estaciones. Este subensamble también cuenta con cuatro fibras ópticas distribuidas entre las diferentes operaciones que se realizarán en el *indexer*, es decir, cuatro estaciones formarán parte del procesamiento de las piezas, mientras que las restantes serán de espera o *stand by*.

#### 4.3.5. Processing

En esta subestación se realiza el maquinado de las piezas, el cual es alimentado por medio del *indexer*. La estructura es fabricada en aluminio 6061 y el actuador neumático guiado es de 40mm de *bore* y 40mm de *stroke* (figura 4.9). Es de suma importancia resaltar la utilización de cilindros guiados en esta operación, de lo contrario la herramienta sujeta en actuador podría girarse y no realizar la operación correctamente.

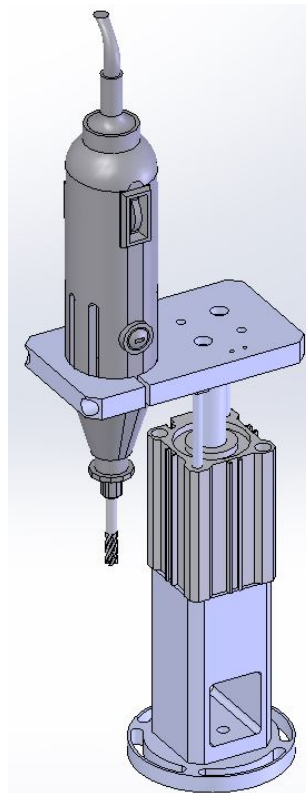


Figura 4.9: Diseño de subestación *processing*.

La herramienta rotativa que se consideró para el proceso de barrenado es el modelo 4000 de la marca Dremel. Esta herramienta será utilizada con la configuración de 5000 RPM. Cabe resaltar, que la velocidad en la que bajará el dremel debe ser controlada para evitar que se dañe el cortador o la pieza.

#### 4.3.6. Validation

Una vez procesadas las piezas, el *indexer* alimenta la subestación de validación, la cual consiste en una estructura similar a la *processing*. La única diferencia notable es el herramental utilizado para fijar el sensor que realiza la validación del proceso anterior (figura 4.10). El sensor utilizado en este proceso es de contacto, este puede ser utilizado para mandar una señal de entrada digital o análoga al PLC. Para este caso en particular, se utilizará un amplificador para mandar únicamente señales digitales.

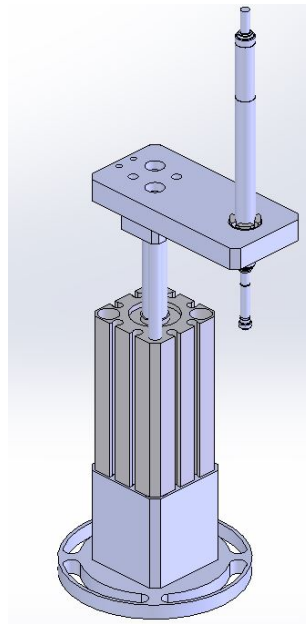


Figura 4.10: Diseño de subestación *validation*.

La prueba que se realiza en esta subestación verifica la presencia del barreno realizado en la subestación anterior. El actuador neumático se retrae a velocidad regulada y la punta del sensor hace contacto en el fondo del barreno hasta retraerse y detectar por medio del amplificador la presencia del barreno.

#### 4.3.7. Transportation

Un vez las piezas hayan pasado por las estaciones de *processing* y *validation*, independientemente del resultado obtenido en la validación, el *indexer* alimenta la subestación de *transportation*, Siendo esta la estación final del *indexer*, es la encargada de transportar las piezas procesadas a la siguiente subestación por medio de un arreglo de actuadores neumáticos (figura 4.11). Al igual que la subestación de *pick and place*, este sistema esta conformado por tres actuadores que en conjunto fungen el transporte de las piezas de una subestación a otra. Cabe resaltar, que el gripper tiene instalado una fibra óptica para garantizar que se haya recolectado la pieza exitosamente.

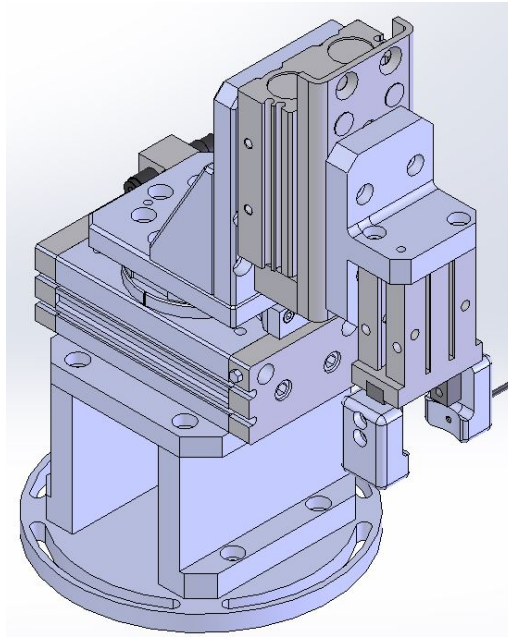


Figura 4.11: Diseño de subestación *transportation*.

La estructura esta fabricada completamente de aluminio 6061 y las características de los cilindros utilizados en este arreglo es el siguiente:

- Mesa rotativa neumática de 2 posiciones de 30mm. El cilindro tiene la capacidad de girar de 0 a 190 grados sin la posibilidad de posiciones intermedias. También, posee dos amortiguadores con el fin de absorber el impacto del giro de una posición a otra. Contará con 3 sensores de carrera (0 y 190 grados).
- Mesa deslizante de precisión de 20mm de *bore* y 20mm de *stroke*. Contará con 2 sensores de carrera (extendido y retraído).
- *Gripper* o pinza paralela neumática de 20mm de *bore* y 10mm de *stroke* por pinza. Contará con 2 sensores de carrera (extendido y retraído).

#### 4.3.8. Classification

Esta subestación es el final del proceso del 'diseño original', el cual consiste en un contenedor de tres cavidades fabricado en aluminio 6061. Esta será alimentada a través de la subestación *transporting*, la selección del contenedor donde se dispensará la pieza dependerá totalmente de la señal que reciba la mesa giratoria donde esta ensamblado el contenedor (figura 4.12).

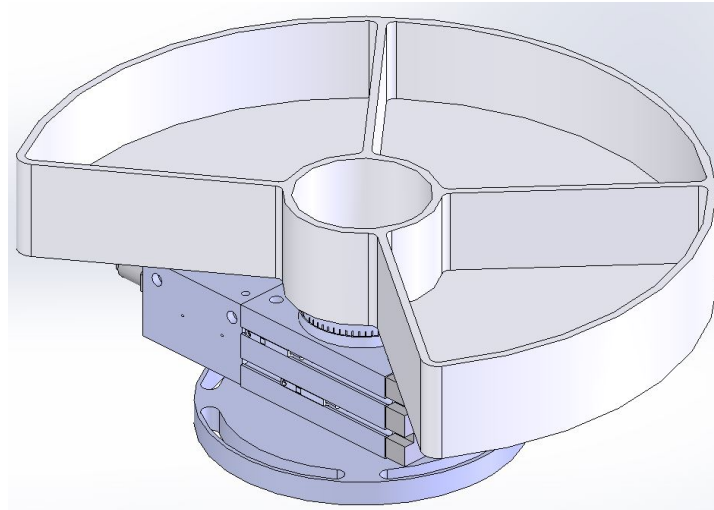


Figura 4.12: Diseño de subestación *classification*.

La diferencia entre la mesa rotativa de esta subestación y la de *transporting*, es que esta es de tres posiciones y la otra es solamente de dos. Se utiliza una electroválvula 5-3 de centro abierto con retorno al centro con el fin de disponer de las tres posiciones que tiene el contenedor. Si se acciona un solenoide, gira hacia la izquierda, si se acciona el otro, gira a la derecha, pero si no se acciona alguno, se mantiene en la posición central.

#### 4.3.9. Placa neumática y de control

En la parte frontal de la estructura principal se instalará una placa de aluminio 6061 con el fin de montar los módulos de control electrónico y neumático tal y como se muestra en la figura 4.13. Se utilizarán canaletas de plástico con el fin de cablear las mangueras neumáticas y cables eléctricos.

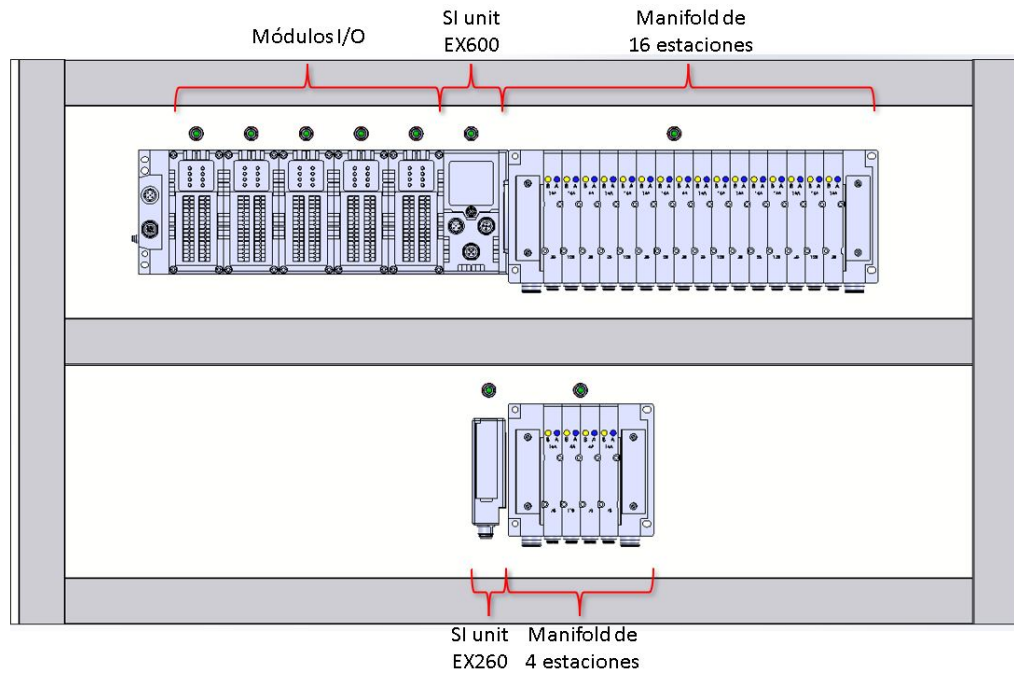


Figura 4.13: Diseño de la placa neumática y de control.

Los componentes que se instalarán en la placa neumática y de control son los siguientes:

- 1 SI unit EX600
- 3 módulos de 16 entradas EX600-DXPD para un total de 48 entradas disponibles.
- 2 módulos de 16 salidas EX600-DYPB para un total de 32 salidas disponibles.
- 1 manifold de 16 estaciones.
- 1 SI unit EX260.
- 1 manifold de 4 estaciones.
- 20 electroválvulas 5-3 de 1/4, centro cerrado con retorno al centro.

El beneficio de implementar los *SI unit* (unidad de interfaz serial, por sus siglas en inglés) 600 y 260, se traduce en la reducción de la cantidad de conexiones físicas necesarias para comunicar las entradas y salidas del manifold y los módulos de control al PLC. Normalmente, el EX600 sería suficiente para comunicar las entradas y salidas, pero una de las limitantes que tiene este módulo consiste en que solamente tiene la capacidad de comunicar 4 bytes de información por parte del manifold, es decir, 32 bits (16 electroválvulas). En este proyecto se utiliza

un total de 20 electroválvulas, por lo que hace necesario implementar otro SI unit (EX260) para satisfacer la necesidad de comunicar 4 electroválvulas adicionales.

Por otro lado, del lado izquierdo del EX600 se integran los módulos de entradas y salidas. En la tabla 4.2 se indica la cantidad de entradas digitales requeridas para desarrollar el módulo didáctico, mientras que en la tabla 4.1 las salidas digitales. Se determinó que hay un total de 35 entradas y 22 salidas, dado esto, se contará con 13 entradas y 10 salidas sobrantes para la implementación de nuevas tecnologías para trabajos futuros.

| Componente           | Descripción                                   | Total |
|----------------------|-----------------------------------------------|-------|
| Dremel               | Encender dremel                               | 22    |
| Led verde torreta    | Máquina encendida                             |       |
| Led amarillo torreta | Máquina en proceso                            |       |
| Led rojo torreta     | Fallo en la máquina                           |       |
| Led verde            | Ubicación de base de inicio                   |       |
| Led verde            | Ubicación de slider de pick and place         |       |
| Led verde            | Ubicación de base de feeder                   |       |
| Led verde            | Ubicación de dremel                           |       |
| Led verde            | Ubicación de sensor de contacto               |       |
| Led verde            | Ubicación de indexer y fibras                 |       |
| Led verde            | Ubicación actuador rotativo de transporting   |       |
| Led verde            | Ubicación actuador rotativo de classification |       |
| Led verde            | Ubicación de amplificadores y módulos         |       |
| Led verde            | Ubicación de módulo de entrada 1              |       |
| Led verde            | Ubicación de módulo de entrada 2              |       |
| Led verde            | Ubicación de módulo de entrada 3              |       |
| Led verde            | Ubicación de módulo de salida 1               |       |
| Led verde            | Ubicación de módulo de salida 2               |       |
| Led verde            | Ubicación de SI unit EX600                    |       |
| Led verde            | Ubicación de SI unit EX260                    |       |
| Led verde            | Ubicación de manifold de 16 estaciones        |       |
| Led verde            | Máquina encendida                             |       |

Tabla 4.1: Salidas del módulo didáctico.

| Componente           | Descripción                                                 | Total |
|----------------------|-------------------------------------------------------------|-------|
| Botón pulsador verde | Encender máquina                                            | 35    |
| Botón pulsador rojo  | Apagar máquina                                              |       |
| Selector de llave    | Reiniciar máquina                                           |       |
| Sensor de color      | Color blanco                                                |       |
| Sensor de color      | Color negro                                                 |       |
| Sensor de color      | Color azul                                                  |       |
| Fibra óptica         | Presencia de pieza en gripper de pick and place             |       |
| Sensor de carrera    | Posición inicial de slider horizontal de pick and place     |       |
| Sensor de carrera    | Posición intermedia de slider horizontal de pick and place  |       |
| Sensor de carrera    | Posición final de slider horizontal de pick and place       |       |
| Sensor de carrera    | Posición inicial de slider vertical de pick and place       |       |
| Sensor de carrera    | Posición final de slider vertical de pick and place         |       |
| Sensor de carrera    | Gripper abierto de pick and place                           |       |
| Sensor de carrera    | Gripper cerrado de pick and place                           |       |
| Fibra óptica         | Presencia de pieza en base de feeding                       |       |
| Sensor de carrera    | Posición inicial de actuador de pin                         |       |
| Sensor de carrera    | Posición final de actuador de pin                           |       |
| Fibra óptica         | Presencia de pieza en estación 1 de indexer                 |       |
| Fibra óptica         | Presencia de pieza en estación 2 de indexer                 |       |
| Fibra óptica         | Presencia de pieza en estación 3 de indexer                 |       |
| Fibra óptica         | Presencia de pieza en estación 4 de indexer                 |       |
| Sensor de carrera    | Posición inicial en actuador de processing                  |       |
| Sensor de carrera    | Posición final en actuador de processing                    |       |
| Sensor de carrera    | Posición inicial en actuador de validating                  |       |
| Sensor de carrera    | Posición final en actuador de validating                    |       |
| Sensor de carrera    | Posición en indexer de cilindro rotativo de transporting    |       |
| Sensor de carrera    | Posición en contenedor de cilindro rotativo de transporting |       |
| Sensor de carrera    | Posición inicial de slider vertical de transporting         |       |
| Sensor de carrera    | Posición final de slider vertical de transporting           |       |
| Sensor de carrera    | Gripper abierto de transporting                             |       |
| Sensor de carrera    | Gripper cerrado de transporting                             |       |
| Fibra óptica         | Presencia de pieza en gripper de transporting               |       |
| Sensor de carrera    | Posición izquierda de classification                        |       |
| Sensor de carrera    | Posición central de classification                          |       |
| Sensor de carrera    | Posición derecha de classification                          |       |

Tabla 4.2: Entradas del módulo didáctico.

#### 4.3.10. Ayudas visuales

Las ayudas visuales incluyen una amplia variedad de visuales para máquinas y tareas específicas para ayudar a mejorar la eficiencia y efectividad de la interacción hombre-máquina. Las ayudas visuales implementadas en el módulo didáctico son:

- **Torreta:** Se utiliza para informar al usuario del estatus actual del módulo didáctico mediante el encendido y apagado de leds verde, amarillo y rojo. El led verde indica que la máquina esta encendida, el amarillo que esta en proceso y el rojo que hubo una falla en el funcionamiento de la máquina. La torreta utilizada es de la marca WERMA, es alimentada por 24 VDC/VAC, mide 70mm X 210.2m (diámetro X largo) y tiene un ángulo de visión de 360 grados. Cabe mencionar. que se utilizó un bracket con el fin de sujetar la torreta sobre la estructura de la subestación *pick and place* tal y como se muestra en la figura 4.14.

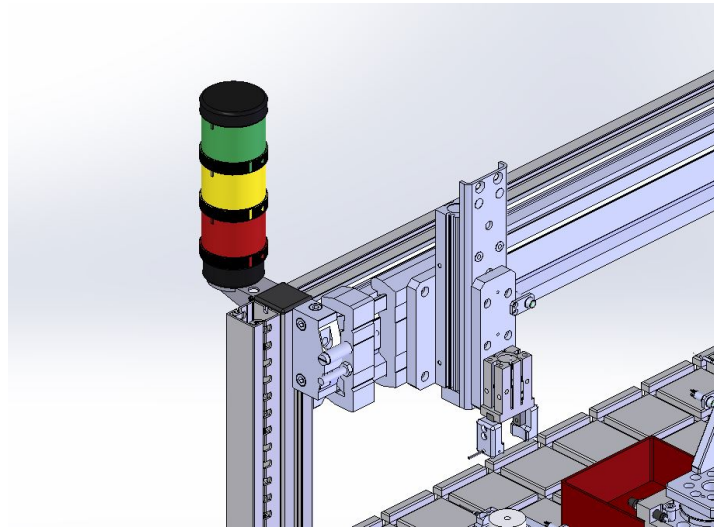


Figura 4.14: Torreta indicadora de estado actual de máquina.

- **Leds:** Se colocó estratégicamente por todo el módulo didáctico leds verdes de 8mm con la finalidad de indicar al usuario la ubicación de cada una de las diferentes tecnologías implementadas. Por ejemplo, en la figura 4.15 se coloca un led en la base principal de la subestación *transporting* con el fin de ubicar en la máquina las tres tecnologías implementadas. Cada uno de los leds serán activados a través de la HMI con la función de aprendizaje implementada en la misma. Cabe mencionar, que esta función se explicará más adelante en otra sección.

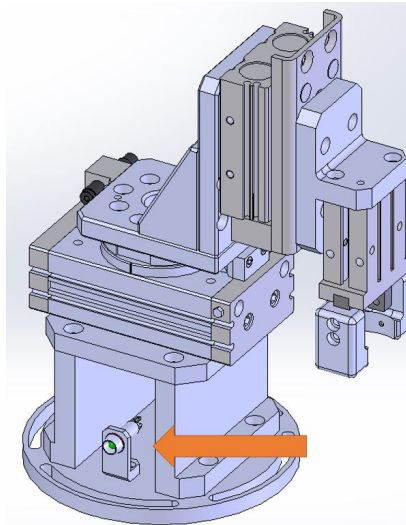


Figura 4.15: Ejemplo de led indicadores.

- **Amplificadores y módulos:** Estos dispositivos fueron ubicados al alcance del usuario con el fin de facilitar el mantenimiento y configuración de los sensores de color y fibras ópticas implementadas en el módulo didáctico. Debido a que dichos dispositivos están completamente expuestos a daños, se fabricará una guarda perimetral de resina de policarbonato de la marca LEXAN, la cual contará con una puerta de acceso a los amplificadores y el controlador multisensor tal y como se muestra en la figura 4.16.

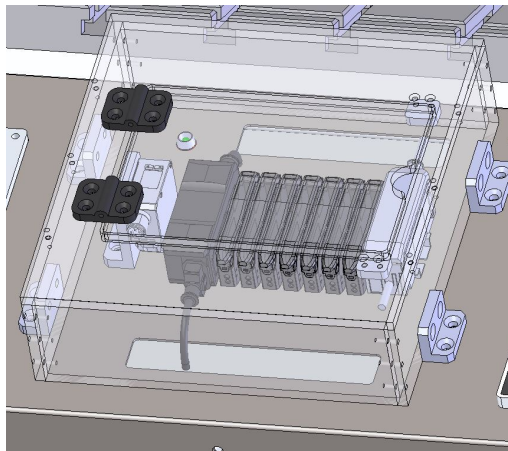


Figura 4.16: Ubicación de amplificadores y controlador multisensor.

- **Interfaz hombre-máquina (HMI):** Es la herramienta principal utilizada por el usuario para coordinar, controlar y comprender los procesos que se ejecutan en el módulo didáctico. En ella se implementará un software esquemático controlado por pulsadores táctiles,

el cual permitirá el control manual del equipo, supervisión a tiempo real de los procesos y una enciclopedia de información. La interfaz será colocada junto a los amplificadores con el fin de que sea de fácil acceso para el usuario tal y como se muestra en la figura 4.17.

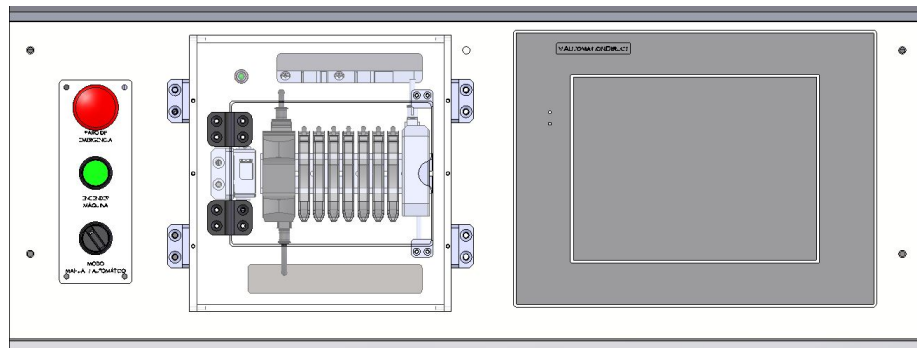


Figura 4.17: Ubicación de la HMI.

#### 4.3.11. Ensamble general

Las subestaciones y tecnologías integradas conforman el módulo didáctico propuesto para la enseñanza de PLC. En la figura 4.18 se muestra el ensamble general de la estación con todas las subestaciones trabajando en total armonía creando una línea de producción de práctica completa.

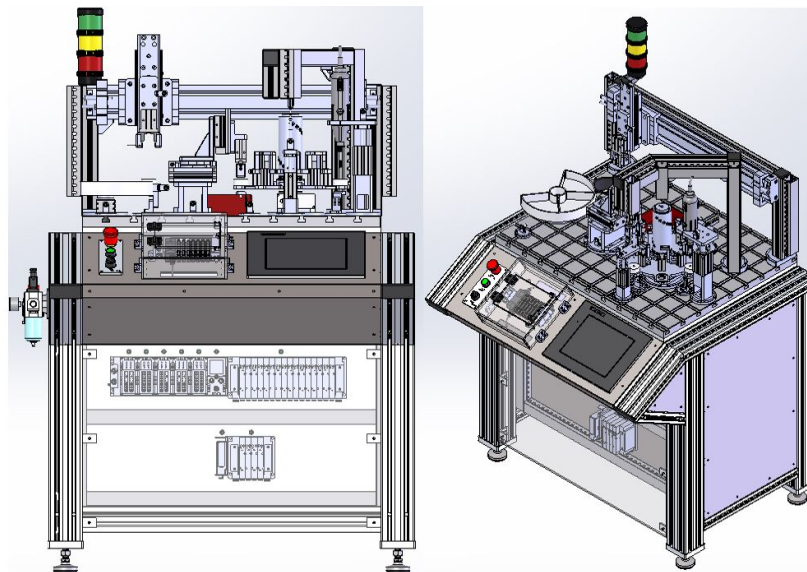


Figura 4.18: Vista isométrica y frontal del ensamble general.

## 4.4. Modelado y simulación

En esta sección se busca determinar si la estructura propuesta para el desarrollo del módulo didáctico cuenta con la capacidad de soportar los fenómenos físicos ejercidos sobre esta a través del *software ANSYS*. De igual manera, se simulará el funcionamiento del 'diseño original' a través del *software HPetri*.

### 4.4.1. Análisis mecánico

Debido a que ninguna de las subestaciones integradas en el módulo didáctico ejerce un esfuerzo que pueda repercutir en la rigidez de la estructura, se considerará en este estudio solamente el esfuerzo que ejerce el peso de las tecnologías integradas en el módulo. La carga que se espera que la estructura sea capaz de soportar es de al menos 9810N que corresponde 1000Kg. Los análisis que se realizarán en la estructura a través del *software* son:

- Deformación total
- Estrés equivalente
- Factor de seguridad
- Vida

Los resultados obtenidos de dichos estudios indican que la deformación máxima resultante al aplicar los 9810N al centro de la placa es de 0.28576mm y la mínima de 0.031751mm, lo cual permite concluir que es despreciable para la carga que se esta aplicando. En la figura 4.19 las zonas rojas representan las zonas donde se presenta la máxima deformación, mientras que las zonas azules la mínima.

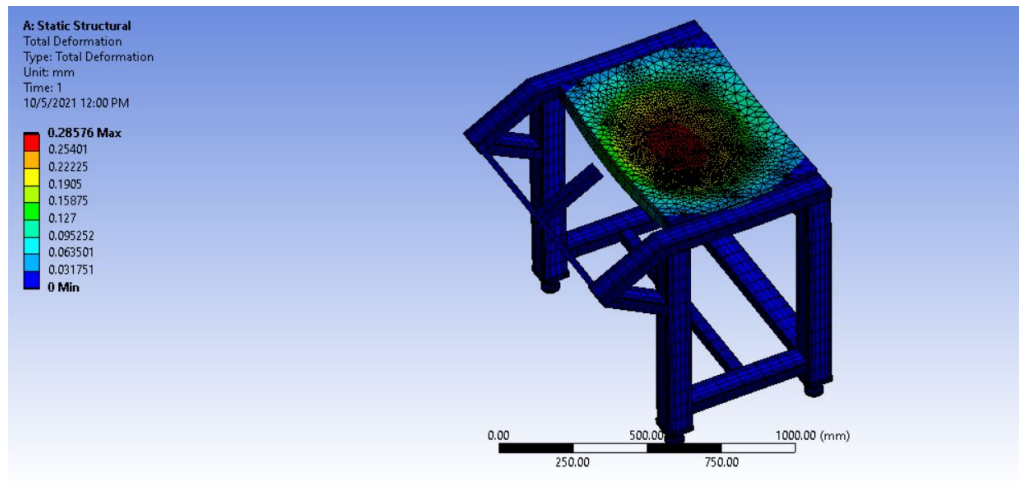


Figura 4.19: Deformación total de la estructura.

En el caso del estrés de Von Mises, el estrés máximo resultante en la estructura es 43.186MPa que esta representado con el color rojo. Mientras que el estrés mínimo es de  $1,2113e^{-5}$ , que esta representado con el color azul. Lo anterior mencionado se puede observar en la figura 4.20.

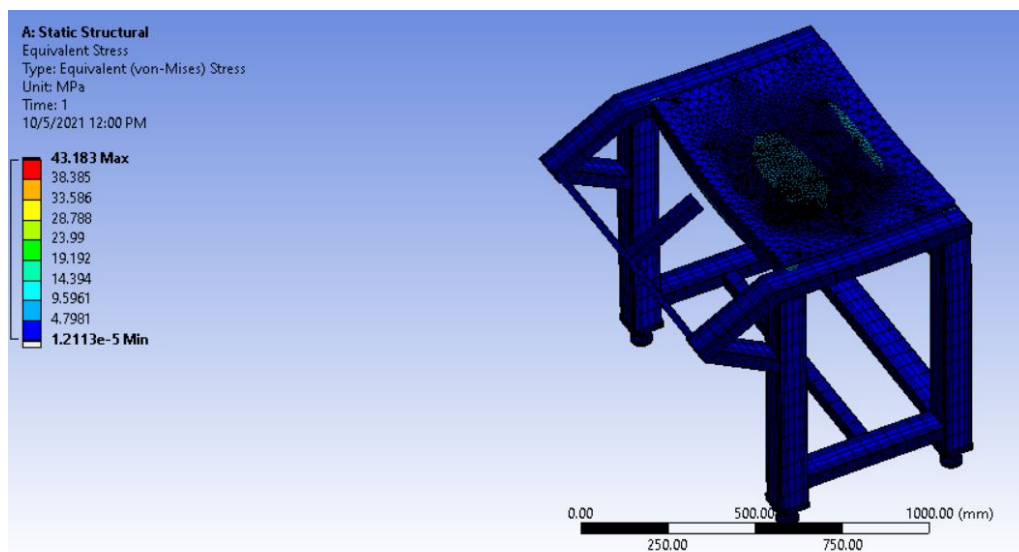


Figura 4.20: Estrés de Von Mises de la estructura.

El factor de seguridad máximo obtenido es de 15 y esta representado de color azul en la estructura. Mientras que el mínimo es de 2.3157 y esta representado con el color naranja. Es posible observar en la figura 4.21 que la estructura es completamente azul, por lo que podemos determinar que el ensamble tiene un factor de 15 en toda la estructura, por lo que se puede

concluir que la estructura es excesivamente segura.

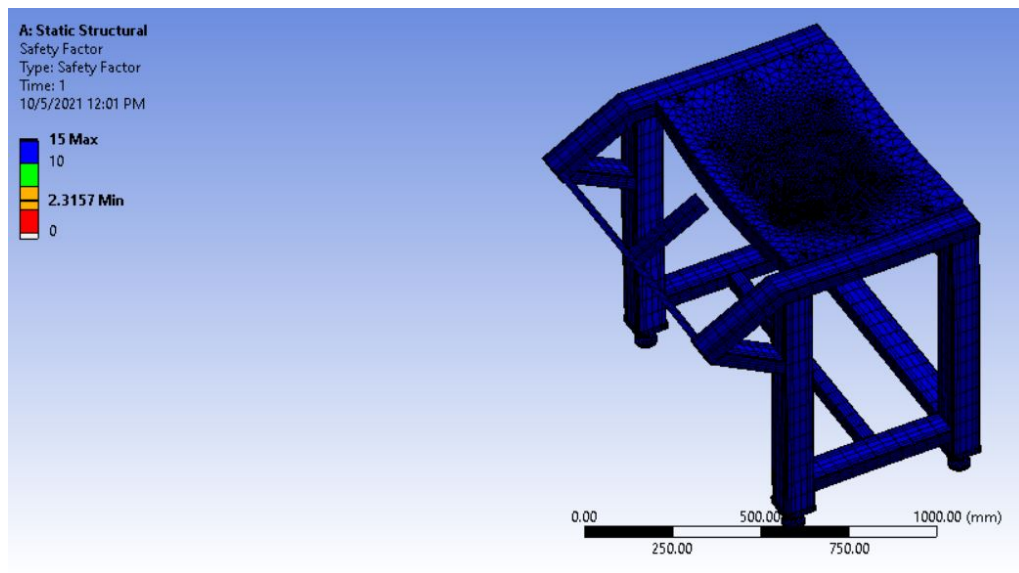


Figura 4.21: Factor de seguridad de estrés en la estructura.

Finalmente, la vida nos indica que la vida máxima de la estructura es de 100,000,000 ciclos y es representado con las zonas color azul. Mientras que la vida mínima es de 1,000,000 de ciclos, que es representado por las zonas color rojo. Lo anterior mencionado se puede observar en la figura 4.22. Este estudio indica que se requerirán al menos un millón de ciclos con esta fuerza aplicada para obtener un fallo en la estructura y un máximo de cien millones de ciclos para el fallo.

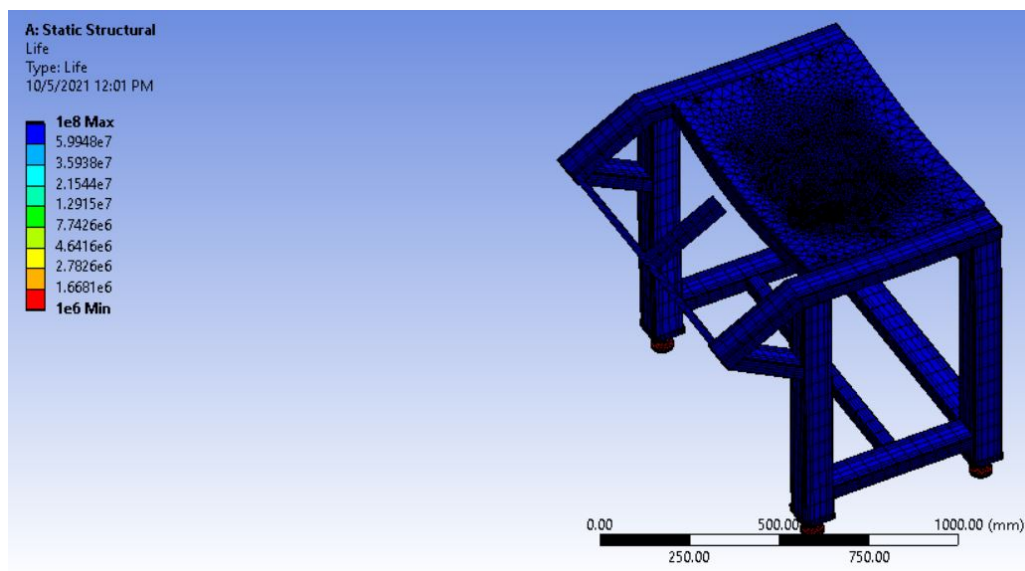


Figura 4.22: Vida de la estructura.

## Capítulo 5

### Conclusión

Como consecuencia de los avances tecnológicos en la actualidad, se hace necesario que los alumnos de las universidades tengan acceso en forma directa a las nuevas tecnologías desarrolladas para facilitar el funcionamiento y desarrollo de equipos automatizados. Bajo esta creciente necesidad se propuso un módulo didáctico enfocado para que los alumnos de ingeniería mecatrónica posean una interacción con las nuevas tecnologías y de esta manera puedan obtener un conocimiento teórico-práctico en lo que se refiere en desarrollo de sistemas donde se involucra la mecánica, electrónica y neumática. La metodología utilizada para el desarrollo del módulo didáctico resultó ser efectiva ya que facilitó el proceso de diseño. Como trabajo a futuro de este proyecto, se tiene que desarrollar una interfaz didáctica donde se facilite el aprendizaje de sistemas basados en PLC y neumática. Posteriormente, Simular o fabricar el módulo con el fin de validar su eficacia en la enseñanza.

# Bibliografía

- [1] Gilchrist, A. (2016). Industry 4.0: the industrial internet of things. Apress.
- [2] M. Bustamante, G. Moreno, A. Pelaez and C. Madrigal, "Design and implementation of an automation didactic module focused to machine vision and programmable logic control," 2014 III International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA), Cartagena, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/CIIMA.2014.6983451.
- [3] Engineering Technician Education Programme Accreditation Standard 2019, (accessed July 1, 2019). [Online]. Available: <http://etac.org.my/diploma-programme/manual-for-diploma/>.
- [4] Świder, J., Michalski, P., & Wszolek, G. (2006). Laboratory support for the didactic process of engineering processes automation at the Faculty of Mechanical Engineering
- [5] J. G. M. Chávez and L. C. E. C. Díaz, "Work in Progress: Design and implementation of a didactic module with manual interface, PLC interface and PC serial interface for teaching process control techniques," 2019 IEEE World Conference on Engineering Education (EDUNINE), Lima, Peru, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/EDUNINE.2019.8875832.
- [6] Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, 6(4), 239–242. doi:10.1007/s12599-014-0334-4
- [7] Hermann, M., T. Pentek, and B. Otto. 2016. "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios." Proceedings of 2016 49th Hawaii International Conference on Systems Science, January 5–8, Maui, Hawaii. doi:10.1109/HICSS.2016.488.

- [8] Jasperneite, J. 2012. "Was Hinter Begriffen Wie Industrie 4.0 Steckt." *Computer & Automation* 12: 24–28.
- [9] Kagermann, H., W. Wahlster, and J. Helbig. 2013. "Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group." Acatech-National Academy of Science and Engineering, Germany.
- [10] Lasi, H., F. Peter, F. Thomas, and M. Hoffmann. 2014. "Industry 4.0." *Business & Information Systems Engineering* 6 (4): 239–242.
- [11] Lu, Y. 2017. "Cyber Physical System (CPS)-based Industry 4.0: A Survey." *Journal of Industrial Integration and Management* 2(3). doi:10.1142/S2424862217500142
- [12] GTAI (Germany Trade & Invest). 2014. *Industries 4.0-Smart Manufacturing for the Future*. Berlin: GTAI.
- [13] The Economist Intelligence Unit: *The Internet of Things Business Index: A Quiet Revolution Gathers Pace* (2013)
- [14] Beckert, S.: *Empire of Cotton: A Global History*. Knopf, New York (2014)
- [15] Gökalp, E., Şener, U., & Eren, P. E. (2017). Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM. *Software Process Improvement and Capability Determination*, 128–142. doi:10.1007/978-3-319-67383-7\_10
- [16] Langmann, R., & Rojas-Pena, L. F. (2016). A PLC as an Industry 4.0 component. 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV). doi:10.1109/rev.2016.7444433
- [17] J. Swider, G. Wszolek, *Collection of laboratory and design tasks concerning the control of process technologies*, Silesian University of Technology, Gliwice 2003 (in Polish)
- [18] T. Legierski, J. Wyrwal *PLC Programming*, Jaska Skalmierski's Publishing Company, Gliwice 1998 (in Polish).
- [19] J. Swider, G. Wszolek, *Analysis of complex mechanical systems based on the block diagrams and the matrix hybrid graphs method*. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, the Netherlands, 157-158 (2004) 250-255.

- [20] Cristolțean, D.C. and Silea, I. Didactic equipment for studying automation and applied informatics. 12th IEEE International Symposium on IEEE Trans. Ind. Informatics Electronics and Telecommunications (ISETC) 2016, 27-28
- [21] Step by Step Procedure of PLC Programming in Industries, (accessed July 30, 2019). [Online]. Available: <https://www.watelectronics.com/how-to-program-the-programmable-logic-controllers/>.
- [22] Cristolțean, D.-C., & Silea, I. (2016). Didactic equipment for studying automation and applied informatics. 2016 12th IEEE International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC). doi:10.1109/isetc.2016.7781081
- [23] Alszer, S., & Krystek, J. (2018, April). Modular, didactic flexible manufacturing system—Case study. In 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR) (pp. 121-125). IEEE.
- [24] Khairudin, A. R. M., & Abu-Samah, A. (2019). Teaching industrial automation through development of didactic PLC. ON UNIVERSAL WELLBEING (ICUW 2019), 161.
- [25] Da'na, S., Sagahyroon, A., Elrayes, A., Al-Ali, A. R., & Al-Aydi, R. (2008). Development of a monitoring and control platform for PLC-based applications. *Computer Standards & Interfaces*, 30(3), 157–166.
- [26] Soloman, S. (2010). *Sensors and control systems in manufacturing*. McGraw-Hill Education.
- [27] Regtien, P. P. (2012). *Sensors for mechatronics*. Elsevier.
- [28] Guide to the expression of uncertainty in measurement; International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1995; ISBN 92-67-10188-9.
- [29] ISA S37.1: Electrical transducer nomenclature and terminology, 1975; ISBN 0-87664-113-3.
- [30] ISA-S37.2, Specification and tests for piezoelectric acceleration transducers.

- [31] ISA-S37.3, Specification and tests for strain gage pressure transducers, 1982; ISBN 0-87664-378-0.
- [32] ISA-S37.5, Specification and tests for strain gage linear acceleration transducers.
- [33] ISA-S37.6, Specification and tests for potentiometric pressure transducers, 1982; ISBN 0-87664-380-2.
- [34] ISA-S37.12, Specification and tests for strain gage force transducers.
- [35] ISA-S37.10, Specification and tests for piezoelectric pressure transducers, 1982; ISBN 0-87664-382-9.
- [36] ISA-S37.12, Specification and tests for potentiometric displacement transducers, 1977; ISBN 0-87664-359-4.
- [37] Du, W. Y. (2014). Resistive, capacitive, inductive, and magnetic sensor technologies. CRC Press.
- [38] Pallas-Areny, R., & Webster, J. G. (2012). Sensors and signal conditioning. John Wiley & Sons.
- [39] Ramírez, G. (2016). Se buscan más ingenieros mecatrónicos para México. Manufactura. Published. <https://manufactura.mx/gestion/2016/04/15/se-buscan-ingenieros-mecatronicos>
- [40] Diagnóstico y Prospectiva de la Mecatrónica en México. Centro de Investigación en Materiales Avanzados SC. México. 2011.
- [41] Yin, S., & Ruffin, P. (2006). Fiber optic sensors. Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering.
- [42] Bastos, R. P., & Torres, F. S. (2020). On-Chip Current Sensors for Reliable, Secure, and Low-Power Integrated Circuits. Springer.
- [43] Iniewski, K. (Ed.). (2017). Smart sensors for industrial applications.
- [44] Soloman, S. (2010). Sensors handbook. McGraw-Hill Education.

- [45] Webster, J. G., & Eren, H. (Eds.). (2018). *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Two-Volume Set*. CRC press.
- [46] Popovic, R. S., Flanagan, J. A., & Besse, P. A. (1996). The future of magnetic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 56(1-2), 39–55. doi:10.1016/0924-4247(96)01285-x.
- [47] J.E. Lenz. A review of magnetic sensors, *Prec. IEEE*, 78 (1990) 973- 989.
- [48] J. Heremans, Solid state magnetic sensors and applications, 1 *Phys. D: Appl. Phys.*, 26 ( 1993 ) 1149- I
- [49] 1.2 Physical Quantities and Units – College Physics chapters 1–17. (s. f.). Pressbooks. Recuperado 15 de noviembre de 2021, de <http://pressbooks-dev.oer.hawaii.edu/collegephysics/chapter/1-2-physical-quantities-and-units/>
- [50] S. Middelhoek, S.A. Audet: *Silicon sensors*; Academic Press, London, San Diego, New York, Berkeley, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto, 1989; ISBN 0-12-495051-5.
- [51] Gomis-Bellmunt O (2007) Design, modeling, identification and control of mechatronic systems. PhD thesis, Technical University of Catalonia
- [52] Gomis-Bellmunt O, Galceran-Arellano S, Sudri'a-Andreu A, Montesinos-Miracle D, Campanile LF (2007) Linear electromagnetic actuator modeling for optimization of mechatronic and adaptronic systems. *Mechatronics* 17:153–163
- [53] Bishop, R. H. (2002). *The mechatronics handbook-2 volume set*. CRC press.
- [54] Gomis-Bellmunt, O., & Campanile, L. F. (2009). *Design rules for actuators in active mechanical systems*. Springer Science & Business Media.
- [55] *Mechatronic Systems*. (2003). doi:10.1007/1-84628-259-4
- [56] Akubude, V. C., Ogunlade, C. A., & Adeleke, K. M. (2020). Actuators in Mechatronics. *Actuators*, 33–44. doi:10.1002/9781119662693.ch3
- [57] Janocha, H. (Ed.). (2004). *Actuators*. doi:10.1007/978-3-662-05587-8

- [58] Pace, C. (s. f.). Actuation in mechatronic systems. Mechatronics 1. <https://iteachstem.com.au/wp-content/uploads/2020/03/MFE3004AdditionalPT5.pdf>
- [59] MFE 3004, Actuation in Mechatronic Systems. Retrieved online from <https://www.meprogram.com.au/wpcontent/uploads/2018/03/MFE3004AdditionalPT5.pdf>, 2019.
- [60] Andrighetto, P. L., Valdiero, A. C., & Carlotto, L. (2006). Study of the friction behavior in industrial pneumatic actuators. In ABCM Symposium series in mechatronics (Vol. 2, No. 2, pp. 369-376).
- [61] Ali, H. I., Noor, S. B. B. M., Bashi, S. M., & Marhaban, M. H. (2009). A review of pneumatic actuators (modeling and control). Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(2), 440-454.
- [62] Paternoster, A., de Boer, A., Loendersloot, R., & Akkerman, R. (2010). Actuators for Smart Applications. ASME 2010 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, Volume 1. doi:10.1115/smasis2010-3905
- [63] PI PI (2005-2006) The world of Micro- and Nanopositioning
- [64] Janocha H (2000) Adaptronics and Smart Structures. Springer Verlag
- [65] Bishop RH (ed) (2002) The Mechatronics Handbook. CRC Press
- [66] Ando Y, Ikehara T, Matsumoto S (2002) Design, fabrication and testing of new comb actuators realizing three-dimensional continuous motions. Sensors and Actuators A: Physical 97-98:579–586
- [67] Campanile LF (2007) Adaptive Structures: Engineering applications, John Wiley and Sons, chap Lightweight shape-adaptable airfoils: a new challenge for an old dream, pp 89–135
- [68] King, T. G., Preston, M. E., Murphy, B. J. M., & Cannell, D. S. (1990). Piezoelectric ceramic actuators: A review of machinery applications. Precision Engineering, 12(3), 131–136. doi:10.1016/0141-6359(90)90084-c

- [69] George Rzevski (Ed.), *Mechatronics, Perception, Cognition and Execution*, Butterworth-Heinemann, 1995
- [70] Salem, F. A., & Mahfouz, A. A. (2014). *Mechatronics Design And Implementation Education-Oriented Methodology; A Proposed Approach*. *Mechatronics*, 1(3).
- [71] Escobar, L., Carvajal, N., Naranjo, J., Ibarra, A., Villacis, C., Zambrano, M., & Galarraga, F. (2017). Design and implementation of complex systems using Mechatronics and Cyber-Physical Systems approaches. 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation.
- [72] Guerineau, B., Bricogne, M., Durupt, A., & Rivest, L. (2016). Mechatronics vs. cyber physical systems: Towards a conceptual framework for a suitable design methodology. 2016 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) /17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM).
- [73] S. Turki, T. S. Lismma, and A. Sghaier, "A SysML profile for mechatronics integrating bond graphs," in 9th WSEAS International Conference CIRCUITS, COMMUNICATIONS, COMPUTERS (CSCC'05), 2005, no. Ea 2336, p. 22
- [74] F. Barnu, "Applications industrielles mécatroniques: quelques exemples," *Tech. l'Ingénieur*, vol. 33, no. 0, p. 9, 2010.
- [75] M. Abramovici and F. Bellalouna, "Integration and complexity management within the mechatronics product development," *Adv. Life Cycle Eng. Sustain. Manuf. Businesses*, pp. 113–118, 2007.
- [76] F. Harashima, M. Tomizuka, and T. Fukuda, "Mechatronics - What is it, why, and how?," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 1–4, Mar. 1996.
- [77] D. Freddi, "The integration of old and new technological paradigms in low- and medium-tech sectors: The case of mechatronics," *Res. Policy*, vol. 38, no. 3, pp. 548–558, Apr. 2009.
- [78] Vasic´ VS, Lazarevic´ MP. Standard industrial guideline for mechatronics product design. *FME Trans* 2008;36:103–8.

- [79] Komoto H, Tomiyama T. A system architecting tool for mechatronic systems design. CIRP Ann – Manuf Technol 2010;59:171–4.
- [80] Wang, Y., Yu, Y., Xie, C., Zhang, X., & Jiang, W. (2013). A proposed approach to mechatronics design education: Integrating design methodology, simulation with projects. *Mechatronics*, 23(8), 942–948.
- [81] Tutunji TA, Saleem A, Abd Rabbo S. An undergraduate mechatronics project class at Philadelphia University, Jordan: methodology and experience. *IEEE Trans Educ* 2009;52(3):365–74.
- [82] R. Rajkumar, I. Lee, L. Sha and J. Stankovic, *Çyber-physical systems: the next computing revolution*, in *Proceedings of the 47th Design Automation Conference*, 2010.
- [83] R. Rajkumar, “A cyber-physical future,” *Proc. IEEE*, vol. 100, no. SPL CONTENT, pp. 1309–1312, 2012.
- [84] S. E. Lyshevski, “*Electromechanical Systems, Electric Machines, and Applied Mechatronics*,” CRC Press, 1999.
- [85] T.-R. Hsu, ‘Mechatronics. An overview,’ *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol. Part C*, vol. 20, no. 1, pp. 4–7, 1997.
- [86] M. Bricogne, “*Méthode Agile pour la conception collaborative multidisciplinaire de systèmes intégrés : application à la Mécatronique*,” Université de Technologie de Compiègne, 2015.
- [87] D. K. Miu, “*Mecatrónica: Electromecánica y contromecánica*”, Nueva York, NY: Springer New York, 1993.
- [88] R. Harrison, D. Vera and B. Ahmad, “Engineering methods and tools for cyber–physical automation systems,” *Proceedings of the IEEE*, 104(5), pp. 973–985, 2016.
- [89] O. Penas, R. Plateaux, J.-Y. Choley, H. Kadima, T. Soriano, C. Combastel, and A. Rivière, “*Conception mécatronique - Vers un processus continu de conception mécatronique intégrée*,” *Tech. l’Ingénieur*, 2010.

- [90] P. Devalan, "Introduction à la mécatronique," Tech. l'Ingénieur, p. 10, 2010.
- [91] L. Philippe, "Normalisation en mécatronique," Tech. l'ingénieur Mécatronique, no. ref. article : bm8080, p. 9, 2012.
- [92] R. (Raj) Rajkumar, I. Lee, L. Sha, and J. Stankovic, "Cyber-physical systems," in Proceedings of the 47th Design Automation Conference on - DAC '10, 2010, p. 731.
- [93] E. A. Lee, "Cyber Physical Systems: Design Challenges," 2008 11th IEEE Int. Symp. Object Component-Oriented Real-Time Distrib. Comput., pp. 363–369, 2008.
- [94] Y. Tan, S. Goddard, and L. C. Pérez, "A prototype architecture for cyber-physical systems," ACM SIGBED Rev., vol. 5, no. 1, pp. 1– 2, Jan. 2008.
- [95] Gupta S, Kumar S, Tewari L. A design-oriented undergraduate curriculum in mechatronics education. Int J Eng Educ 2003;19(4):563–8.
- [96] Spence1 A, Doyle T. Product centric CAD education. Comput-Aided Des Appl 2008;5(1–4):381–90.
- [97] Tomiyama T, Gu P, Jin Y, Lutters D, Kind C, Kimura F. Design methodologies: industrial and educational applications. CIRP Ann – Manuf Technol 2009;58: 543–65.
- [98] Hehenberger P, Poltschak F, Zeman K, Amrhein W. Hierarchical design models in the mechatronic product development process of synchronous machines. Mechatronics 2010;20:864–75.
- [99] R. Isermann, Mechatronic design approach, The Mechatronics Handbook, CRC Press, Boca Raton, 2002, pp. 3 Section I: Overview of mechatronics
- [100] K. Craig, F. Stolfi "Teaching control system design through mechatronics: academic and industrial perspectives." Mechatronics, Vol 12, No. 2, pp. 371-381, 2002,
- [101] Janthong, N., Brissaud, D., & Butdee, S. (2010). Combining axiomatic design and case-based reasoning in an innovative design methodology of mechatronics products. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2(4), 226–239. doi:10.1016/j.cirpj.2010.05.005

- [102] A. Warniez, O. Penas, and T. Soriano, "About metrics for integrated mechatronic system design," in 2012 9th France-Japan & 7th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) / 13th Int'l Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM), 2012, pp. 450–457.
- [103] R. Isermann, Mechatronic design approach, The Mechatronics Handbook, CRC Press, Boca Raton, 2002, pp. 3 Section I: Overview of mechatronics.
- [104] J. Gausemeier, S. Moehring, New guideline vdi 2206-a flexible procedure model for the design of mechatronic systems, DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design (2003).
- [105] Mcharek, Mehdi & Hammadi, Moncef & Azib, Toufik & Larouci, Cherif & Choley, Jean-Yves. (2019). Collaborative design process and product knowledge methodology for mechatronic systems. Computers in Industry. 105. 213-228. 10.1016/j.compind.2018.12.008.
- [106] S. Wiesner, M. Freitag, I. Westphal, K.-D. Thoben, Interactions between service and product lifecycle management, Procedia Cirp 30 (2015) 36–41.
- [107] F. Peluso, Knowledge Reuse and Collaborative Environments in Industrial Engineering, (2015) .
- [108] A. Kellner, P. Hehenberger, L. Weingartner, M. Friedl, Design and use of system models in mechatronic system design, Systems Engineering (ISSE), 2015 IEEE International Symposium on, (2015) , pp. 142–149.
- [109] M. Törngren, A. Qamar, M. Biehl, F. Loiret, J. El-Khoury, Integrating viewpoints in the development of mechatronic products, Mechatronics 24 (2014) 745–762.
- [110] M.D. Petty, Verification and validation, Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach, (2009) , pp. 121–149.
- [111] M. Hammadi, J.-Y. Choley, O. Penas, A. Rivière, Mechatronic system optimization based on surrogate models-application to an electric vehicle, Simultech, (2012) , pp. 11–16.